



**Technische  
Universität  
Braunschweig**

---

# **Bedürfnisorientierte Informationsverteilung in vernetzten Mobilitätsszenarien**

**Von der Carl-Friedrich-Gauß-Fakultät  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
zur Erlangung des Grades eines**

**Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)**

**genehmigte Dissertation**

von Lutz Kelch  
geboren am 04.05.1971  
in Berlin

Eingereicht am:	04.02.2016
Disputation am:	20.06.2016
1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf
2. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner

(2016)



## Kurzfassung

In den letzten Jahren ist die Zahl vernetzter Fahrzeuge kontinuierlich gestiegen. Während derzeit die meisten mobilen Onlinedienste in den Bereichen Infotainment und Navigation angesiedelt sind, ist zukünftig mit einer Ausdehnung in die Domäne der Fahrerassistenz zu rechnen. Systeme wie Gefahrenwarner oder Baustellenassistenten werden in Echtzeit mit neuen Daten versorgt, kartenbasierte Assistenzfunktionen erhalten tagesaktuelle Updates des Kartenmaterials. Da diese Systeme mitunter aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, gelten hohe Anforderungen bezüglich der Qualität und Aktualität der Daten. Zu spät zugestellte bzw. fehlende Daten können zu Fehlfunktionen oder Ausfällen führen, die ein Sicherheitsrisiko für die Fahrzeuginsassen wie auch andere Verkehrsteilnehmer darstellen.

Die Vernetzung der Fahrzeuge über das Internet ist derzeit ausschließlich über Mobilfunknetze realisiert. Mobilfunknetze zeichnen sich einerseits durch eine hohe geographische Abdeckung aus, allerdings ist die Qualität des Datenkanals örtlichen Schwankungen unterlegen. Diese Qualitätsschwankungen können sich negativ auf die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der mobilen Dienste auswirken. Ein Weg zur Steigerung der Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit ist die Verwendung sogenannter Connectivity-Maps. Connectivity-Maps enthalten georeferenzierte Daten zur Qualität bzw. zu Eigenschaften des Mobilfunknetzes, die im Rahmen von Messfahrten gesammelt wurden. Dieses a priori Wissen kann verwendet werden, um die Übertragung von Daten aus dem Internet in die Fahrzeuge proaktiv zu planen. Die Übertragungszeitpunkte können so gewählt werden, dass eine möglichst hohe Qualität des Mobilfunkkanals vorliegt. In diesem Fall ist die spektrale Effizienz hoch, so dass weniger „wertvolle“ Ressourcen der Luftschnittstelle für die Übertragung eines Datenobjektes benötigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, das die Datenverteilung von einem zentralen Server zu den Fahrzeugen optimiert. Ziel der Optimierung ist es, die Reihenfolge, in der die Daten versendet werden, so zu wählen, dass unter Berücksichtigung individueller spätester Zustellzeitpunkte eine möglichst hohe Ausnutzung der Luftschnittstelle erreicht wird, also die Daten bei möglichst hohen Kanalqualitäten versendet werden. Die Arbeit fokussiert sich auf den Mobilfunkstandard High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) und verwendet als Maß für die Kanalqualität den sogenannten Channel Quality Indicator (CQI). Aus gemessenen CQI-Werten wird zunächst die CQI-Karte erstellt, die den ortsbezogenen Zugriff auf historische CQI-Daten erlaubt. Auf Basis dieser Daten prädiziert ein Modell Übertragungsdauer und Kanalausnutzung der Datenobjekte. Anhand dieser Prädiktion kann eine optimale Sendereihenfolge ermittelt werden. Die umfangreiche Evaluation des Verfahrens erfolgt unter Verwendung einer im Kontext dieser Arbeit entwickelten Simulationsumgebung.



## Abstract

The number of connected cars is growing continuously. While currently most mobile services reside in the areas of infotainment and navigation, an extension to the domain of driver assistance systems is to be expected. Systems such as hazard or construction site assists are supplied with new data in real time, map based assistance functions receive updates of the map data on a daily basis. As these systems may actively intervene in the driving process, high requirements concerning the quality and timeliness of the data have to be met. Delayed or missing data may cause malfunctions posing a safety risk to vehicles' passengers and other road users.

At the moment cellular networks are used to connect vehicles to the internet. Cellular networks are characterized by a large geographical coverage, but the quality of the wireless data channel suffers from local fluctuations. These fluctuations of channel quality may have a bad impact on the functionality and reliability of the mobile services. A way to improve the functionality and reliability is to use so called connectivity maps. Connectivity maps offer georeferenced characteristics of the cellular network, which have been collected within measurement drives. This a priori knowledge can be used to plan the transmission of data from the internet to the vehicles proactively. The transmission times can be chosen to ensure a maximum channel quality resulting in a high spectral efficiency. With high spectral efficiency, less precious resources of the air interface are required to transmit a data object.

This thesis offers a new concept to optimize the data distribution from a central server to vehicles. The objective of the optimization is to find a data objects' order, which maximizes the utilization of the air interface but considers individual deadlines. The work focusses on High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) and uses the Channel Quality Indicator (CQI) to measure the channel quality. Initially a CQI-map is created using in field CQI measurements. This map provides location based access to historical CQI values. These values are used to predict transmission duration and channel utilization. Based on the predictions the optimal transmission order is calculated. An extensive evaluation is carried out using a simulation environment, which has been developed within this thesis.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Online-Daten im Fahrzeug - Connected Cars . . . . .	1
1.2. Datenverteilung über Mobilfunk . . . . .	3
1.3. LTE: Die Lösung? . . . . .	4
1.4. Bedürfnisorientierung . . . . .	5
1.5. Zielsetzung der Arbeit . . . . .	6
1.6. Struktur der Arbeit . . . . .	7
<b>2. Datenübertragung mit HSDPA</b>	<b>9</b>
2.1. Aufbau des HSDPA-Netzes . . . . .	9
2.2. Kanalstruktur . . . . .	11
2.3. Protokollstack und Datenfluss . . . . .	12
2.3.1. Protokollstack der Nutzerebene . . . . .	13
2.3.2. Iub-Flusskontrolle und Datenpufferung . . . . .	15
2.4. RRC-Protokollzustände . . . . .	15
2.5. Datenübertragung über Highspeed-Kanäle . . . . .	17
2.5.1. WCDMA . . . . .	18
2.5.2. Adaptive Modulation und Kodierung . . . . .	18
2.5.3. HARQ . . . . .	19
2.5.4. Scheduling . . . . .	20
2.6. Zellwechsel . . . . .	22
2.7. TCP über HSDPA: Der Bufferbloat-Effekt . . . . .	23
<b>3. CQI-Map</b>	<b>25</b>
3.1. Verwandte Arbeiten . . . . .	26
3.2. Erzeugung der Karte . . . . .	28
3.2.1. Erfassung der Rohdaten . . . . .	28
3.2.2. Map Matching der erfassten Daten . . . . .	30
3.2.3. Segmentierung der CQI-Daten . . . . .	32
3.2.4. Attributierung der digitalen Straßenkarte . . . . .	36
3.3. CQI und Datendurchsatz . . . . .	37
3.3.1. Berechnung des maximalen Datendurchsatzes . . . . .	37
3.3.2. Auslastung der Luftschnittstelle . . . . .	39
3.3.3. Maximal erreichbarer Datendurchsatz . . . . .	39
3.3.4. Bestimmung der Zellkapazität . . . . .	41
3.4. CQI-Verteilung und Zellwechsel . . . . .	42

3.5. Zusammenfassung . . . . .	43
<b>4. Simulationsumgebung</b>	<b>47</b>
4.1. Aufbau der Software . . . . .	47
4.1.1. Simulation HSDPA-Netz und TCP-Datenübertragung . . . . .	47
4.1.1.1. RRC-Zustände . . . . .	48
4.1.1.2. Umsetzung der TCP-Datenübertragung . . . . .	49
4.1.2. Umsetzung Client und Server . . . . .	50
4.1.2.1. Simulation von Mobilität . . . . .	51
4.2. Generierung von Netzlast . . . . .	52
4.2.1. Verwandte Arbeiten . . . . .	53
4.2.2. Netzlastmodell . . . . .	54
4.2.2.1. Identifikation des Scheduler-Typs . . . . .	55
4.2.2.2. Berechnung der Anzahl synthetischer UE . . . . .	56
4.2.2.3. Datendurchsatzberechnung bei Degradierung . . . . .	58
4.2.3. Umsetzung in der Simulationsumgebung . . . . .	59
4.2.4. Validierung . . . . .	59
4.3. Zusammenfassung . . . . .	62
<b>5. Optimierte Datenübertragung</b>	<b>65</b>
5.1. Modell TCP über HSDPA . . . . .	65
5.1.1. Verwandte Arbeiten . . . . .	65
5.1.2. Kennlinienbasiertes Modell . . . . .	66
5.1.3. Überlappung von Datenobjekten . . . . .	70
5.1.4. Vorhersage von CQI-Werten . . . . .	72
5.1.5. Vorhersage gleichzeitig aktiver UE . . . . .	73
5.2. Optimierungsproblem . . . . .	73
5.2.1. Beschreibung von Datenobjekten . . . . .	74
5.2.2. Suchraum und Zielfunktion . . . . .	74
5.2.3. Genetischer Algorithmus . . . . .	76
5.2.4. Simulated Annealing . . . . .	78
5.2.5. Hillclimbing . . . . .	78
5.2.6. Earliest Deadline First Heuristik . . . . .	80
5.2.7. Konfiguration der Algorithmen . . . . .	80
5.3. Zusammenfassung . . . . .	82
<b>6. Evaluation</b>	<b>83</b>
6.1. Szenarien . . . . .	83
6.2. Ergebnisse . . . . .	86
6.2.1. Bewertung des Datenübertragungsmodells . . . . .	86
6.2.2. Vergleich der Optimierungsstrategien . . . . .	88
6.3. Zusammenfassung . . . . .	95



<b>7. Zusammenfassung &amp; Ausblick</b>	<b>97</b>
7.1. Forschungsbeiträge . . . . .	98
7.2. Übertragbarkeit auf andere Mobilfunksysteme . . . . .	101
7.3. Weitere Arbeiten . . . . .	102
<b>A. CQI-Tabelle B</b>	<b>105</b>
<b>B. Messung der RRC-Konfiguration</b>	<b>107</b>
<b>C. Nachrichtenschnittstelle</b>	<b>109</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>111</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Prognose monatliches Datenaufkommen und Verbindungsgeschwindigkeit	5
1.2.	Systemarchitektur	7
2.1.	Systemarchitektur eines UMTS-Netzes	10
2.2.	Kanalzuordnungen für die Nutzdatenübertragung via HSDPA	12
2.3.	HSDPA User Plane Protokollarchitektur	13
2.4.	Datenfluss zwischen den Protokollschichten	14
2.5.	RRC-Protokollzustände	16
3.1.	Aufbau digitale Straßenkarte	32
3.2.	Bewertung von Methoden zur Entrauschung	33
3.3.	Ausschnitt der CQI-Karte	36
3.4.	CQI-Karten für beide Strecken	37
3.5.	Minimale TCP RTT	40
3.6.	CDF der IP-Datendurchsätze für verschiedene CQI-Werte	41
3.7.	Parallele Messung des IP-Datendurchsatzes mit vier SIM-Karten	43
3.8.	Histogramm der CQI-Werte	44
3.9.	IP-Datendurchsatz und CQI-Werte im Bereich von Zellwechseln	45
4.1.	Die Simulationssoftware	48
4.2.	RRC-Konfiguration des verwendeten HSDPA-Netzes	49
4.3.	Applikationsbasierte und schedulerbasierte Lasterzeugung	53
4.4.	CDF der relativen IP-Datendurchsätze	55
4.5.	Beispiel Ablauf Netzlastmodell	60
4.6.	Aufbau zur Validierung der schedulerbasierten Lasterzeugung	61
4.7.	CDF des relativen Datendurchsatzes der Referenzdaten	61
4.8.	CDF der absoluten IP-Datendurchsätze	62
4.9.	Übergangswahrscheinlichkeiten der Verteilungsfunktion	63
5.1.	Komponenten der optimierten Datenübertragung	66
5.2.	Datendurchsatz und empfangene Daten für TCP Slow-Start	67
5.3.	Kennlinienbasierte abschnittsweise Integration	69
5.4.	Überlappung von Datenobjekten	71
5.5.	Einfluss Überlappung auf Übertragungsdauer	72
5.6.	Ablauf Order-Crossover	77
6.1.	Örtliche Lage der betrachteten Szenarien	84

6.2. Schätzfehler Datenübertragungsmodell . . . . .	87
6.3. Verbesserung der Kanalausnutzung . . . . .	91
6.4. Verkürzung der Gesamtübertragungsdauer . . . . .	92
6.5. Verspätet empfangene Datenobjekte, angegeben als Summe der DelayScores	93

# Tabellenverzeichnis

3.1.	Übersicht über die Teststrecken . . . . .	28
3.2.	Hardware-Komponenten des Messaufbaus . . . . .	29
3.3.	Vergleich der Segmentierungsalgorithmen . . . . .	35
3.4.	Vergleich theoretische und gemessene maximale IP-Datendurchsätze . . .	42
4.1.	Konfiguration der Simulationsumgebung . . . . .	50
5.1.	Mittlerer Datendurchsatz und mittlere Anzahl gleichzeitig aktiver UE . . .	73
5.2.	Beschreibung Datenobjekt . . . . .	74
5.3.	Konfiguration von Simulated Annealing- und Hillclimbing-Algorithmus .	81
5.4.	Konfiguration des genetischen Algorithmus . . . . .	81
5.5.	Leistungsfähigkeit der Algorithmen bei den Testszenarien . . . . .	82
6.1.	Verwendete Datenobjekte mit Größe und Priorität . . . . .	86
6.2.	Durchschnittliche Fehler der Kanalausnutzung und der Übertragungsdauer	88
6.3.	Mittlere Verbesserung Kanalausnutzung . . . . .	89
6.4.	Mittlere Verkürzung der Gesamtübertragungsdauer . . . . .	90
6.5.	Verspätet empfangene Datenobjekte, ohne Zellwechsel . . . . .	90
6.6.	Verspätet empfangene Datenobjekte, mit Zellwechsel . . . . .	90
A.1.	CQI Mapping Tabelle B . . . . .	105
B.1.	RRC-Konfiguration des verwendeten HSDPA-Netzwerks . . . . .	108
C.1.	Die Nachrichtenschnitte der Simulationsumgebung . . . . .	109



# 1 Einleitung

Die Vernetzung des Fahrzeugs mit dem Internet schreitet immer weiter voran. Fast jeder Automobilhersteller vertreibt Fahrerinformationssysteme, die online bereitgestellte Daten nutzen. Während der Fahrt können beispielsweise Wetternachrichten oder Börsenkurse abgerufen und E-Mails empfangen werden. Vernetzte Navigationsfunktionen verwenden Echtzeit-Verkehrsdaten, die ein präzises Abbild der Verkehrslage geben und damit die Qualität der dynamischen Navigation verbessern.

Zukünftige Systeme werden diesen Funktionsumfang stetig erweitern. Aus dem Home-Entertainment bekannte Funktionen wie das Streaming von Medien oder die Videotelefonie werden im Fahrzeug Einzug halten. Das Fahrzeug wird damit zu einem mobilen Endgerät [1].

Neben Unterhaltungs- und Informationsdiensten werden auch Fahrerassistenzsysteme von den Möglichkeiten des vernetzten Fahrzeugs profitieren. Stauende- oder Hinderniswarner können online mit neuen Daten versorgt werden, kartenbasierte Fahrerassistenzsysteme wie Baustellenassistenten oder Kurvenlicht wird stets aktuelles Kartenmaterial bereitgestellt, so dass die zuverlässige Funktion sichergestellt ist. Da es sich bei diesen Fahrerassistenzsystemen neben passiven auch um aktive Systeme handeln kann, die in die Fahrzeugaktuatorik eingreifen oder sogar automatisch fahren, gelten hohe Anforderungen bzgl. der Qualität sowie der Aktualität der Daten.

## 1.1. Online-Daten im Fahrzeug - Connected Cars

Die Verbreitung sogenannter Connected Cars, also Fahrzeuge, die über eine Datenverbindung mit dem Internet vernetzt sind, wird stetig zunehmen. Während 2014 10 % aller Fahrzeuge vernetzt waren, erwartet [2] bei Neuwagen eine Ausstattungsrate von 90 % im Jahr 2020. Die Zahl der vernetzten Fahrzeuge beträgt dann 700 Millionen [3]. Ein wesentlicher Faktor für diese Entwicklung dürfte die Verpflichtung zur Ausstattung von Fahrzeugen mit einem eCall-Modul sein, die ab dem 31.03.2018 für alle neuen Typen von PKW und leichten Nutzfahrzeugen in der gesamten Europäischen Union gilt<sup>1</sup>. Diese eCall-Module sind mit einem Mobilfunkmodem ausgerüstet, über das im Fall eines Unfalls automatisch ein Notruf erfolgt. Die Hürde zur Installation einer entsprechenden Hardware entfällt damit.

Eine Analyse der derzeit von den deutschen Volumenherstellern angebotenen online-fähigen Systeme lässt folgende drei Kategorien von datenbasierten Diensten erkennen [4, 5, 6, 7]:

---

<sup>1</sup>Angenommener Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates:  
<http://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-16345-2014-INIT/de/pdf>

- Dienste aus dem Bereich Infotainment wie z.B. Audiostreaming, Nachrichten oder Wettervorhersagen aber auch der Zugriff auf Internetseiten und soziale Medien
- Unterstützung der Navigation durch Zugriff auf Echtzeit-Verkehrsinformationen sowie Sonderziele (sogenannte POIs) oder freie Parkplätze
- Remote-Dienste zum Zugriff auf Fahrzeugfunktionen, z.B. zum Start der Standheizung oder Verriegeln/Entriegeln des Fahrzeugs per Smartphone-Applikation

Auf die Frage nach den meist gewünschten Diensten gaben in der Studie [2] 73% der Teilnehmer an, Interesse an Sicherheits- sowie Diagnosefunktionen zu haben, der Zugriff auf soziale Medien im Fahrzeug war ein untergeordnetes Bedürfnis. Mit dem Wort Sicherheit ist dabei die Betriebssicherheit (engl. Safety) gemeint. Dieser Trend lässt erwarten, dass zukünftig sogenannte Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) im Fahrzeug Einzug halten werden, die unter Verwendung von online bereitgestellten Daten zur Erhöhung der passiven wie aktiven Sicherheit beitragen. Beispiele hierfür sind Stauende- oder Gefahrenwarner, die in Echtzeit Informationen über vorausliegende Ereignisse erhalten. Der nächste Evolutionsschritt ist nach Einschätzung von [3] die Einführung von automatischen Fahrfunktionen. Für die folgenden Generationen vernetzter Fahrzeuge ist demnach ein Trend zu Fahrerassistenzfunktionen zu erwarten, die einerseits aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, auf der anderen Seite auf online bereitgestellten Daten arbeiten.

Neben den Fahrzeugherstellern drängen auch Technologiefirmen auf den Markt und wollen über eine enge Kopplung mit dem Fahrzeug Dienste auf dem Mobiltelefon anbieten. Über eine entsprechende Schnittstelle zum Fahrzeug können kompatible Applikationen den zentralen Bildschirm des Infotainmentsystems zur Anzeige nutzen, die Bedienung erfolgt über die vorhandenen Bedienelemente wie Touchscreen oder Drehdrücksteller. Aus Sicht des Mobiltelefons wird das Fahrzeug zum Zubehör. Die prominentesten Beispiele hierfür sind die Produkte *Apple CarPlay*<sup>2</sup> und *Android Auto*<sup>3</sup> der Firmen Apple und Google.

Nach [1] benötigt das vernetzte Fahrzeug neben den fahrzeugseitig implementierten Diensten weitere IT-Infrastruktur in Form eines zentralen Backend-Systems. Dieses Backend-System übernimmt einerseits Verwaltungsaufgaben, ist andererseits auch für die Bereitstellung von Funktionen und Informationen verantwortlich. Zu den Verwaltungsaufgaben gehören beispielsweise die Authentifizierung und Autorisierung der Nutzer sowie die Abrechnung der in Anspruch genommenen Leistungen. Die Bereitstellung von Funktionen und Informationen umfasst sowohl die Implementierung eigener Dienste wie auch die Anbindung bzw. Integration von Diensten aus dem Internet. Durch Aufbereitung und Aggregation von Daten können weitere neuartige Dienste entstehen.

Ein weiterer im Backend berücksichtigter Aspekt ist die Sicherstellung der Stabilität der externen, aus dem Internet angebotenen Dienste. Im Fall von Schnittstellenände-

---

<sup>2</sup><https://www.apple.com/ios/carplay/>

<sup>3</sup><http://www.android.com/auto/>



rungen dieser Dienste fungiert das Backend als sogenannter Adapter, der zwischen alter und neuer Schnittstelle übersetzt und somit die Funktionsfähigkeit der in Fahrzeugen realisierten Funktionen sicherstellt.

## 1.2. Datenverteilung über Mobilfunk

Die Vernetzung derzeit auf dem Markt befindlicher Fahrzeuge mit dem Internet erfolgt ausschließlich über Mobilfunknetze, entweder unter Verwendung des Mobiltelefons des Kunden oder über ein im Fahrzeug verbautes Modem [4, 5, 6, 7]. Mobilfunknetze zeichnen sich einerseits durch eine hohe geografische Abdeckung aus und erlauben den Nutzern, quasi überall online zu sein, auf der anderen Seite ist die Qualität des Mobilfunknetzes örtlichen Schwankungen unterlegen. Dies beinhaltet einerseits unterschiedliche regionale Verfügbarkeiten der unterschiedlichen Mobilfunktechnologien, andererseits können, bezogen auf eine Mobilfunktechnologie, unterschiedliche Signalqualitäten, z.B. hervorgerufen durch Abschattung, die erreichbaren Datendurchsätze beeinflussen. Die Messungen von [8, 9] zeigen, dass sich die Downloadgeschwindigkeiten signifikant mit der Fahrzeugbewegung ändern, bei [8] führt bereits eine Bewegung um 20-30 m zu einer deutlichen Veränderung der Download-Geschwindigkeit. In der speziell für High Speed Packet Access (HSPA) erstellten empirischen Studie [10] wurde nachgewiesen, dass Bewegung einen überwiegend negativen Einfluss auf die Performanz des Mobilfunknetzwerks hat.

Diese schwankenden Qualitäten des Mobilfunknetzes können einen negativen Einfluss auf die angebotenen mobilen Dienste haben. Dieser negative Einfluss kann von starken Verzögerungen beim Herunterladen von Inhalten bis zur völligen Nichtverfügbarkeit des Dienstes reichen. Die Studie [11] kommt zu dem Ergebnis, dass der bedeutendste Faktor in der subjektiven Qualitätswahrnehmung, der sogenannten „Quality of Experience“, die Geschwindigkeit der mobilen Anwendung ist. Geschwindigkeit meint dabei die Gesamt-wartezeit vom Start einer Aktion bis zur Verfügbarkeit des Ergebnisses und schließt alle individuellen Einflussfaktoren wie Verbindungsaufbau, Reaktionszeit des Servers usw. ein. Eine hohe Gesamt-wartezeit führt aus Nutzersicht zu einer geringen „Quality of Experience“. Allerdings legen die meisten Nutzer Erfahrungswerte bzgl. der Wartezeit zu Grunde und berücksichtigen dies bei ihrer Bewertung. So werden beispielsweise Verzögerungen bei der Übermittlung von E-Mails mit Dateianhängen eher akzeptiert als bei simplen Textnachrichten. Übertragen auf mobile Dienste im Fahrzeug bedeutet dies, dass die Nutzer eine ähnliche Erwartungshaltung bzgl. der Performanz haben werden wie beim Betrieb von Anwendungen auf Smartphones oder Tablet-Computern. Verzögert zugestellte Datenobjekte führen zu einer niedrigen „Quality of Experience“, die sich negativ auf die Qualitätswahrnehmung des Dienstes oder sogar des gesamten Fahrzeugs auswirken kann.

Während fehlende oder verzögerte Datenobjekte im Infotainmentbereich lediglich zu Komfortverlusten führen, kann dies bei Fahrerassistenzsystemen Fehlfunktionen herbeiführen, die ein Sicherheitsrisiko für die Fahrzeuginsassen wie auch andere Verkehrsteilnehmer darstellen. Advanced Driver Assistance Systems wie Stauende-Assistenten oder

Gefahrenstellen-Warner, die in Echtzeit mit Daten versorgt werden, reagieren mitunter zu spät oder gar nicht, was zu gefährlichen Situationen oder Unfällen führen kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Qualität im Fahrzeug betriebener mobiler Dienste maßgeblich von der zeitgerechten Verfügbarkeit der benötigten Daten abhängt. Die Nutzer erwarten, „always connected“ zu sein [2], unabhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit und Qualität des Mobilfunknetzes. Fehlfunktionen mobiler Dienste können die Kundenzufriedenheit reduzieren und teure Reklamationen sowie Werkstattbesuche nach sich ziehen. Daher ist es wichtig, die Eigenschaften mobiler Datenkanäle, die [3] als das „Nadelöhr“ des Gesamtsystems sieht, bei der Konzeption und dem Betrieb mobiler Anwendungen zu berücksichtigen und so deren Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zu steigern.

Ein möglicher Weg zur Steigerung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit ist die Verwendung sogenannter Connectivity-Maps [8]. Connectivity-Maps enthalten georeferenzierte Daten zur Qualität bzw. zu Eigenschaften des Mobilfunknetzes, die im Rahmen von kontinuierlich stattfindenden Messfahrten empirisch gesammelt und aggregiert wurden. Dieses a priori Wissen kann verwendet werden, um die Datenübertragung zwischen Server und Fahrzeug proaktiv zu optimieren und somit die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der mobilen Anwendungen zu steigern. Die Übertragung von Daten bei hohen Kanalqualitäten und damit hoher spektraler Effizienz führt zu einer besseren Ausnutzung der Luftschnittstelle, es können mehr Daten pro Zeiteinheit übertragen werden.

Neben der Verwendung von Mobilfunknetzen bietet die auf Wireless Local Area Network (WLAN) basierende direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen bzw. zwischen Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur eine Alternative. Diese auch als Vehicular Ad Hoc Networks (VANET) bezeichneten Systeme [12] adressieren vorrangig Anwendungen, die lokal beschränkt sind und damit ein begrenztes geografisches Gebiet abdecken. Beispielsweise sei der Grüne-Welle-Assistent genannt, bei dem Ampelanlagen Informationen zu Schaltzeiten an in der Nähe befindliche Fahrzeuge senden. Die Kommunikation mit Backend-Systemen ist durch Anbindung der Verkehrsinfrastruktur an das Internet zwar möglich, steht aber nicht im Fokus, weswegen diese Technologie im Folgenden nicht weiter betrachtet werden soll.

## 1.3. LTE: Die Lösung?

Der aktuelle Cisco Visual Networking Index<sup>4</sup> [13] geht im Zeitraum von 2014 - 2019 von einer weltweiten durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate des über Mobilfunknetze abgewickelten Datenverkehrs von 57 % aus. In diesem Zeitraum wird sich das monatliche Datenaufkommen von derzeit 2,5 EB auf 24,3 EB in 2019 fast verzehnfachen. Im Jahr 2019 werden 11,5 Milliarden Mobilgeräte erwartet, also fast 1,5 Geräte pro Erdbewohner.

Im gleichen Zeitraum steigt die Verbindungsgeschwindigkeit im Downlink allerdings nur um 9 % pro Jahr. Es wird eine Steigerung von derzeit 1,7 Mbit/s (2014) auf 4,0 Mbit/s in 2019 erwartet. Dieser in Abbildung 1.1 illustrierte Unterschied in den Wachstumsraten

---

<sup>4</sup>Stand Februar 2015

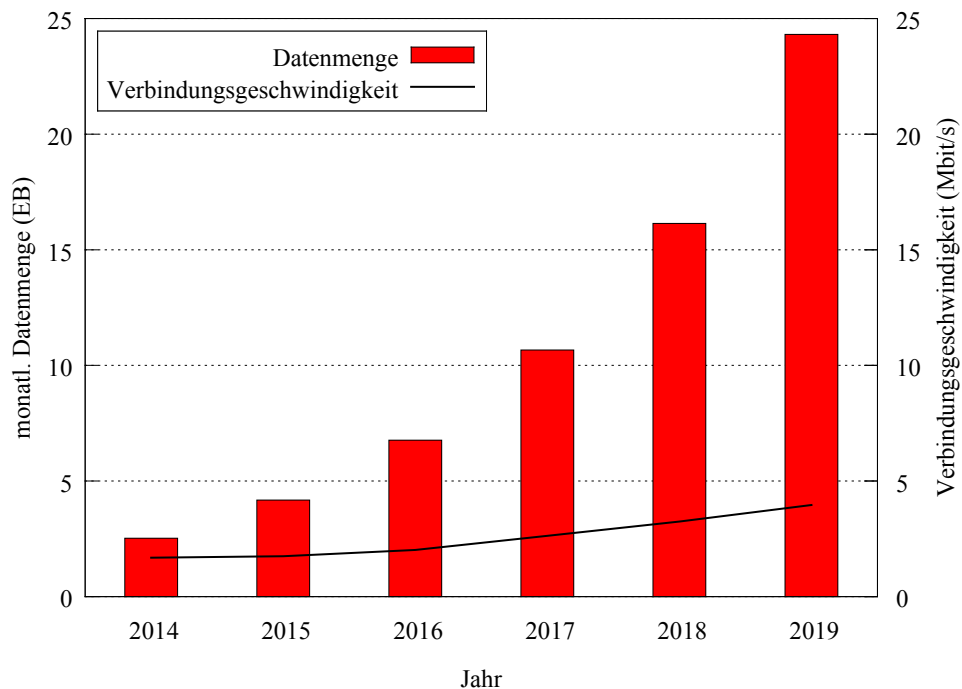


Abbildung 1.1.: Prognose monatliches Datenaufkommen und Verbindungsgeschwindigkeit (Downlink) [13]

bedeutet, dass es zu zu einer stärkeren Auslastung der Mobilfunknetze kommen wird.

Die derzeit schnellste Mobilfunktechnologie Long Term Evolution (LTE) wird sich zwar weiter verbreiten und in 2019 68 % des mobilen Datenverkehrs übernehmen, allerdings wird erwartet, dass die neuen Kapazitäten durch neue mobile Anwendungen mit hohen Anforderungen bzgl. des benötigten Datenvolumens aufgebraucht werden. Hier wird insbesondere der Konsum hochauflösender Videos genannt.

Diese Prognosedaten lassen vermuten, dass die Kapazitäten des Mobilfunknetzes auch in Zeiten von LTE eine wertvolle Ressource bleiben, mit der schonend umgegangen werden muss.

## 1.4. Bedürfnisorientierung

Bedürfnisse nach Informationen im Fahrzeug können durch mehrere Ursachen entstehen. Bedürfnisse können von den Fahrzeuginsassen kommen, die aktiv Informationen anfordern, z.B. durch das Abfragen einer Website oder das Starten eines Videos im Rear Seat Entertainment. Auf der anderen Seite können Bedürfnisse automatisch von Fahrzeugsystemen ausgelöst werden. Fahrzeugsysteme können aktiv Daten anfragen, beispielsweise um den Zwischenspeicher einer satellitenbildergestützten Navigation aktuell zu halten. Als dritte Quelle für die Entstehung von Bedürfnissen sind externe Quellen zu nennen. Neue E-Mails oder aktualisiertes Kartenmaterial stehen auf Webservern bereit und warten auf die Übertragung in das Fahrzeug.

Bezüglich der Übertragung von Daten in das Fahrzeug sind zwei Eigenschaften relevant: der späteste Zustellzeitpunkt, auch Deadline genannt, sowie die Priorität des Datenobjekts. Die Deadline definiert, wann ein Datenobjekt vollständig im Fahrzeug angekommen sein muss, um von einem Dienst oder auch den Insassen ohne Einschränkungen konsumiert zu werden. Kommt ein Datenobjekt zu spät an, kommt es zu Funktionseinschränkungen oder gar Funktionsausfällen.

Um bei der Zuordnung der Ressourcen des Mobilfunkkanals die verschiedenen wartenden Objekte hinsichtlich der Dringlichkeit bewerten zu können, wird als zweites Kriterium eine Priorität definiert. Eine hohe Priorität bedeutet, dass die Deadline verpflichtend ist, zu spät empfangene Daten führen zu Fehlfunktionen bzw. Funktionsausfällen, die einen Einfluss auf die Sicherheit der Fahrzeuginsassen oder anderer Verkehrsteilnehmer haben. Die Deadline von Datenobjekten mittlerer Priorität ist als Empfehlung zu verstehen, die eingehalten werden sollte. Zu spät empfangene Objekte werden als Komfort- oder Qualitätsverlust wahrgenommen, die Sicherheit ist aber nicht beeinträchtigt. Bei Datenobjekten niedriger Priorität ist die Deadline als Empfehlung zu verstehen. Ein Überschreiten hat keinen oder nur einen geringfügigen Einfluss auf die Qualitätswahrnehmung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Szenarien untersucht, in denen Datenobjekte mit unterschiedlichen Deadlines und Prioritäten zu den Fahrzeugen übertragen werden sollen. Die Szenarien beruhen auf realistischen Anwendungsfällen wie beispielsweise Video-streaming oder dem Empfang von E-Mail-Nachrichten. Das Vorherrschen der entsprechenden Bedürfnisse wird als gegeben angesehen und soll nicht weiter untersucht werden.

## 1.5. Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Lösung vorgestellt, mit der die Verteilung von Daten von einem zentralen Server an Fahrzeuge unter Verwendung des Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) optimiert werden kann. Ziel der Optimierung ist es, die Reihenfolge, in der die Daten an die Fahrzeuge verschickt werden, so zu wählen, dass unter Berücksichtigung individueller spätester Zustellzeitpunkte und Prioritäten die Ausnutzung des Mobilfunkkanals maximiert wird. Unter Maximierung der Ausnutzung wird verstanden, dass während des Sendens der Daten eine möglichst hohe Kanalqualität vorherrscht. In diesem Fall ist die spektrale Effizienz hoch, so dass weniger Ressourcen der Luftschnittstelle benötigt werden.

Die Arbeit fokussiert sich auf den Mobilfunkstandard High Speed Downlink Packet Access (HSDPA). HSDPA verwendet als Maß für die Kanalqualität den sogenannten Channel Quality Indicator (CQI). Der CQI wird zyklisch von den Endgeräten zur Basisstation des HSDPA-Netzes übertragen und legt das zur Datenübertragung zu verwendende Modulations- und Kodierungsverfahren fest. Über vom 3rd Generation Partnership Project (3GPP) standardisierte Tabellen kann direkt vom CQI auf die maximal erreichbaren Datenraten und damit die Ausnutzung der Luftschnittstelle geschlossen werden.

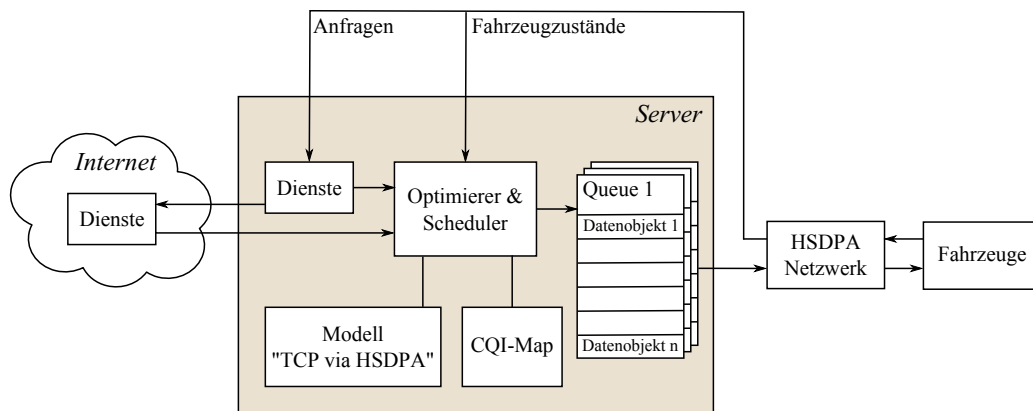


Abbildung 1.2.: Systemarchitektur

Über speziell für HSDPA erstellte CQI-Karten kann der CQI-Verlauf der beteiligten Fahrzeuge prädiziert werden. Anhand dieser prädizierten CQI-Verläufe ist es einem Modell möglich, die Übertragungsdauer und die Ausnutzung der Luftschnittstelle der zu übertragenden Datenobjekte zu schätzen. Diese Schätzungen verwendet der Optimierer zu Bestimmung der optimalen Sendereihenfolge der von den Diensten bereitgestellten Datenobjekte und füllt die Warteschlangen (Queues) entsprechend. Die Optimierung erfolgt pro Mobilfunkzelle, für die jeweils eine Queue existiert. Abbildung 1.2 zeigt die resultierende Systemarchitektur.

Neben der Übertragungsrichtung vom Server zu den Fahrzeugen wird ein Rückkanal benötigt. Über diesen Rückkanal teilen die Fahrzeuge dem Server zyklisch ihren aktuellen Zustand mit und können Anfragen an Dienste stellen. Der Fahrzeugzustand besteht aus der Fahrzeugposition und -geschwindigkeit sowie der Identifikation der verbundenen Mobilfunkzelle und dem CQI-Wert. Diese Werte werden für die Prädiktion des CQI-Verlaufs sowie für die Zuordnung der Fahrzeuge zu den Queues benötigt. Die aktuellen CQI-Werte der Fahrzeuge ermöglichen es dem Server, die CQI-Karte kontinuierlich zu aktualisieren. Das Aktualisieren der CQI-Karte soll im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Über Anfragen können, angestoßen von den Fahrzeuginsassen aber auch automatisch durch die mobilen Anwendungen, Daten bei den Diensten angefragt werden. Die Dienste können lokal im Server oder im Internet implementiert sein. In dieser Arbeit werden statische Szenarien untersucht, das Stellen von Anfragen ist nicht implementiert.

## 1.6. Struktur der Arbeit

Die Arbeit ist wie folgt strukturiert:

Kapitel 2 gibt einen detaillierten Einblick in die Datenübertragung mit HSDPA. Es werden die Komponenten eines HSDPA-Netzes wie auch die beteiligten Netzwerkprotokolle vorgestellt. Die Betrachtung des Bufferbloat-Effekts, einer im Rahmen dieser Arbeit wesentlichen Besonderheit bei der Verwendung von TCP, schließt dieses Kapitel ab.

Die Erstellung der CQI-Karte wird im nächsten Kapitel beschrieben. Dies umfasst die

Schritte bei der Erzeugung der Karte, von der Messung der Daten bis zur Erzeugung der Kartenattribute. Zur Segmentierung der Karte, also zur Identifikation von Bereichen, denen ein identischer mittlerer CQI-Wert zugeordnet wird, findet ein Algorithmus Anwendung, der ursprünglich zur Entrauschung abschnittsweiser konstanter Signale konzeptioniert wurde. Anschließend werden Formeln hergeleitet, über die die maximalen Datendurchsätze in Abhängigkeit des CQI-Wertes hergeleitet werden können. Anhand dieser Formeln wird das vorgestellte Verfahren validiert.

Kapitel 4 stellt die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Simulationsumgebung vor. Es wird ein neuartiges Verfahren zur Generierung von Netzlast vorgestellt. Dieses Verfahren erzeugt Last, indem zusätzliche Endgeräte an der Verteilung der Ressourcen der Luftschnittstelle teilnehmen. Das Modell, also die Anzahl bzw. Verteilung dieser zusätzlichen Endgeräte, wird aus den im vorherigen Kapitel vorgestellten Messungen abgeleitet und abschließend validiert.

Im folgenden Kapitel werden die für die Optimierung der Datenübertragung benötigten Algorithmen und Verfahren vorgestellt. Über ein kennlinienbasiertes Modell kann in Abhängigkeit des CQI-Verlaufs sowie der Anzahl zusätzlich aktiver Endgeräte die Übertragungsdauer wie auch die Ausnutzung der Luftschnittstelle geschätzt werden. Dieses Modell verwenden die anschließend präsentierten Optimierungsverfahren zur Berechnung der optimalen Sendereihenfolge.

Das Modell und die Optimierungsverfahren werden in Kapitel 6 einleitend hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit bewertet. Anhand von insgesamt 768 unterschiedlichen Szenarien erfolgt eine detaillierte Evaluierung, die Ergebnisse werden umfassend diskutiert.

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse zusammen und diskutiert, inwieweit das vorgestellte Verfahren auf neuere Mobilfunksysteme, namentlich Dual Carrier HSPA (DC-HSPA) sowie LTE, übertragbar ist. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf weitere Fragestellungen, die in zukünftigen Arbeiten betrachtet werden können.

## 2 Datenübertragung mit HSDPA

Im Jahr 2002 wurde High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) als Teil des 3GPP Releases 5 spezifiziert. HSDPA basiert technisch auf der dritten Mobilfunkgeneration Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) und wird daher als 3.5G bezeichnet. Das erste kommerzielle HSDPA-Netz wurde Ende 2005 in Betrieb genommen [14]. Zunächst betrug die maximal erreichbare Bruttodatenrate im Downlink 14 MBit/s, diese wurde mit den Releases 7-11 auf derzeit 337,5 MBit/s gesteigert. Diese Erhöhung der Datenrate wurde durch die Verwendung besserer Modulationsverfahren sowie den Einsatz von Mehrantennentechnologien (Multiple Input Multiple Output, MIMO) möglich. Im Release 6 wurde die Erweiterung High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) spezifiziert, mit der auch im Uplink höhere Datenraten erreicht werden können. Die Kombination von HSDPA und HSUPA wird als High Speed Packet Access (HSPA) bezeichnet.

HSDPA basiert auf der Systemarchitektur sowie auf den Wide Code Division Multiplex Access (WCDMA)-Übertragungsmechanismen von UMTS und erweitert diese um folgende Kernfunktionen:

- Einführung neuer logischer und physikalischer Kanäle zur schnellen Datenübertragung
- Verwendung eines zeitscheibenbasierten Verfahrens zur Verteilung der Ressourcen der Luftschnittstelle (Scheduling)
- Verlagerung des Scheduling der Ressourcen der Luftschnittstelle vom RNC in die Basisstation (NodeB)
- Verwendung eines adaptiven Modulations- und Kodierungsverfahrens
- Schnelle Neuübertragung fehlerhafter Datenpakete auf unteren Protokollebenen (MAC-Ebene)

Die folgenden Erklärungen beziehen sich auf die Datenübertragung vom Mobilfunknetz zum Endgerät (Downlink) unter Verwendung des in Release 5 spezifizierten HSDPA, welches bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen vorgefunden wurde. Die ab Release 7 eingeführten Erweiterungen wie MIMO oder Dual Carrier sollen daher nicht betrachtet werden.

### 2.1. Aufbau des HSDPA-Netzes

Abbildung 2.1 zeigt die für die Datenübertragung relevanten Komponenten und Schnittstellen eines UMTS-Netzes. Die für Sprachtelefonie, Nutzerverwaltung etc. benötigten

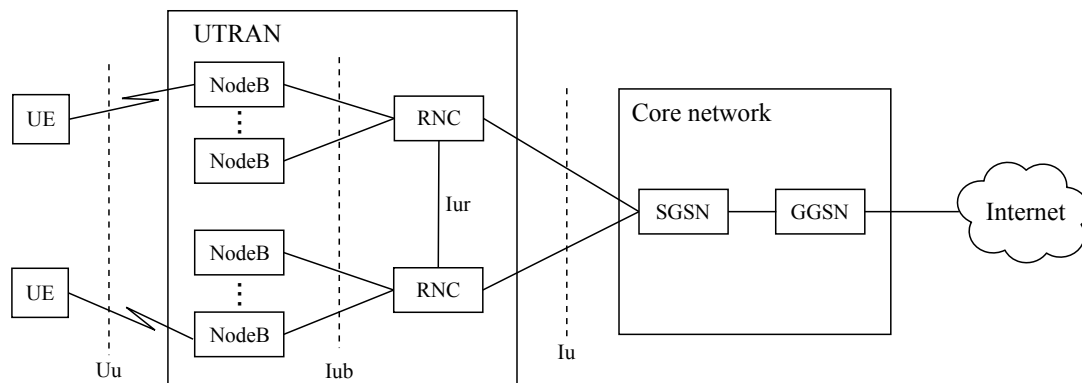


Abbildung 2.1.: Systemarchitektur eines UMTS-Netzes [16]

Systemteile sollen im Folgenden nicht weiter betrachtet werden. Eine Erklärung dieser Teile ist unter anderem in [15] zu finden.

Ein UMTS-Netzwerk besteht aus drei Bereichen, dem Core Network (Kernnetz), dem UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN, Radionetzwerk) sowie den Endgeräten (User Equipment) [16, 15]:

Die für Datendienste relevanten Komponenten des Core Network sind der Serving GPRS Support Node (SGSN) sowie der Gateway GPRS Support Node (GGSN). Der GGSN fungiert als Gateway zum Internet und implementiert Firewalls sowie die Network Address Translation-Funktionalität (NAT) [17]. Der SGSN ist das Bindeglied zwischen dem Core Network und dem UTRAN. Eingehende Datenpakete werden an die zuständigen Radio Network Controller (RNC) über die Iu-Schnittstelle weitergeleitet (Routing). GGSN und SGSN übernehmen zudem Aufgaben im Session- und Mobilitätsmanagement, sind also beim Auf- und Abbau von Verbindungen sowie bei Zellwechseln eingebunden.

Das UTRAN ist für die Verwaltung der Funkressourcen zuständig. Ein UTRAN besteht aus einem oder mehreren Radio Network Subsystemen (RNS). Jedes RNS besteht aus einem RNC sowie einem oder mehreren Basisstationen. Die Basisstationen, die auch als NodeB bezeichnet werden, sind mit den RNCs über die Iub-Schnittstelle verbunden. Der NodeB baut die Funkkanäle auf und ab, verteilt die Ressourcen der Luftschnittstelle (Scheduling) und übernimmt die Fehlerkorrektur und Neuübertragung von Datenpaketen. Dieser Korrekturmechanismus wird als Hybrid automatic repeat request (HARQ) bezeichnet. Der RNC verwaltet die mit ihm verbundenen NodeBs und damit die Ressourcen der Luftschnittstelle unter Einhaltung von Quality of Service-Anforderungen. Zudem ist der RNC für das Mobilitätsmanagement innerhalb des UTRAN zuständig. Das Mobilitätsmanagement beinhaltet Wechsel von Endgeräten zwischen den NodeBs des RNS als auch Wechsel des RNS, also Wechsel in den Zuständigkeitsbereich eines anderen RNC. Im letzteren Fall ist ein Datenaustausch zwischen den betroffenen RNCs nötig, weswegen die RNCs untereinander über die Iur-Schnittstelle verbunden sind.

Die Endgeräte wie z.B. Mobiltelefone oder Modems werden auch als User Equipment (UE) bezeichnet. Die UE tauschen über die Luftschnittstelle Uu Daten mit dem UTRAN



aus.

## 2.2. Kanalstruktur

HSDPA unterscheidet zwischen zwei Arten von Daten, den Nutzdaten und den Signalisierungsdaten. Der Teil des Systems, der sich mit den Nutzdaten befasst, wird User Plane (Nutzerebene) genannt, der andere Teil heißt Control Plane (Kontrollebene). Nutzdaten sind z.B. IP-Datenpakete, die von einem Server zum Endgerät übertragen werden. Signalisierungsdaten finden innerhalb des Mobilfunknetzes Anwendung, z.B. um Verbindungen auf- und abzubauen [15].

Die Übertragung von Nutzer- und Signalisierungsdaten erfolgt über sogenannte Kanäle. Dabei wird zwischen logischen Kanälen, Transportkanälen und physikalischen Kanälen unterschieden. Im Folgenden werden die für die Übertragung von Nutzdaten zum Endgerät über HSDPA relevanten Kanäle erklärt. Dies sind neben Kanälen im Downlink auch Kanäle des Uplinks, über die beispielsweise Empfangsbestätigungen versendet werden. Eine vollständige Übersicht aller Kanäle ist u.a in [15, 16] zu finden.

Die oberste Schicht bilden die logischen Kanäle. Logische Kanäle transportieren jeweils einen Typ von Informationen:

- DTCH

Der Dedicated Traffic Channel (DTCH) ist für die Übertragung von dezidierten, also genau einem Nutzer zugeordneten, Daten verantwortlich.

- CTCH

Über den Common Traffic Channel (CTCH) können Nachrichten an alle Nutzer einer Zelle übertragen werden (Cell Broadcast-Informationen).

Unterhalb der logischen Kanäle liegen die Transportkanäle, die die Daten für eine Übertragung durch die physikalischen Kanäle vorbereiten:

- FACH

Über den Forward Access Channel (FACH) werden in erster Linie Signalisierungsdaten verschickt. Es können aber auch kleinere Mengen von Nutzdaten gesendet werden. In diesem Fall ist dem logischen Kanal DTCH der FACH zugeordnet. Diese Zuordnung wird von der Radio Resource Control (RRC) durchgeführt, die in Abschnitt 2.4 vorgestellt wird.

- HS-DSCH

Der High Speed Dedicated Shared Channel (HS-DSCH) wurde als Teil des 3GPP Releases 5 eingeführt und übernimmt die schnelle Übertragung von Nutzdaten des DTCH an die Endgeräte. Es handelt sich dabei um einen gemeinsamen Kanal (Shared Channel). Die Zuordnung von Ressourcen zu Nutzern ist über ein Zeitscheibenkonzept gelöst und wird in Abschnitt 2.5.4 erklärt.

Die unterste Schicht bilden die physikalischen Kanäle, die für die Informationsübertragung über die Luftschnittstelle verantwortlich sind:

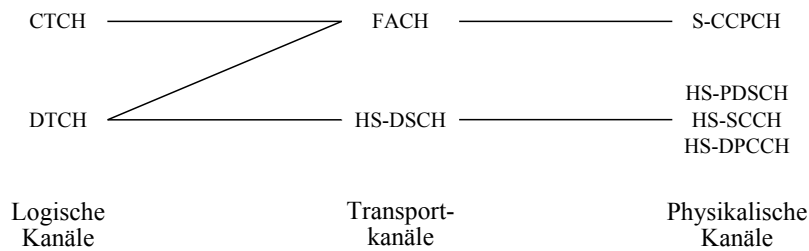


Abbildung 2.2.: Kanalzuordnungen für die Nutzdatenübertragung via HSDPA im Downlink [16]

#### ■ HS-PDSCH

Der High Speed Physical Downlink Shared Channel (HS-PDSCH) ist der zweite Teil der mit dem 3GPP Release 5 eingeführten schnellen Übertragung von Nutzdaten. Eine Erklärung erfolgt ebenfalls in Abschnitt 2.5. Die nötigen Kontrollinformationen, sowohl im Uplink als auch im Downlink, werden über die im Folgenden erklärten HS-SCCH und HS-DPCCH übertragen.

#### ■ HS-SCCH

Über den High Speed Shared Control Channel (HS-SCCH) überträgt der NodeB Informationen über anstehende Datenübertragungen an die UEs, z.B. über die zugeordneten HS-PDSCH oder das verwendete Modulationsverfahren.

#### ■ HS-DPCCH

Der High Speed Dedicated Physical Control Channel (HS-DPCCH) wird von den UEs verwendet, um Statusinformationen zum NodeB zu übertragen. Es handelt sich also um einen Uplink-Kanal. Bei den Statusinformationen handelt es sich um Rückmeldungen zu empfangenen Daten (HARQ) sowie die aktuelle Kanalqualität (CQI).

#### ■ S-CCPCH

Der Secondary Common Control Physical Channel (S-CCPCH) wird vom Transportkanal FACH verwendet und dient daher auch der Übertragung von Nutzdaten.

Abbildung 2.2 zeigt zusammenfassend die Zuordnung der oben erklärten Kanäle.

## 2.3. Protokollstack und Datenfluss

Der HSDPA-Protokollstack besteht analog zur Kanalstruktur aus den Teilen User Plane und Control Plane. Im Folgenden sollen die relevanten Schichten der User Plane sowie der Datenfluss zwischen den Schichten erklärt werden. Hierzu zeigt Abbildung 2.3 [18] die Protokollschichten sowie die Aufteilung auf die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Komponenten des UMTS-Netzes. Abbildung 2.4 zeigt den Datenfluss zwischen den Schichten und erklärt die Zusammenhänge zwischen den Datenobjekten der verschiedenen Schichten.

Für die Datenobjekte werden im Folgenden die Begriffe Protocol Data Unit (PDU) sowie Service Data Unit (SDU) verwendet. Während PDU das vollständige Datenobjekt der

jeweiligen Schicht beschreibt, ist mit SDU der Datenanteil der höheren Schicht gemeint, der in dem PDU transportiert wird.

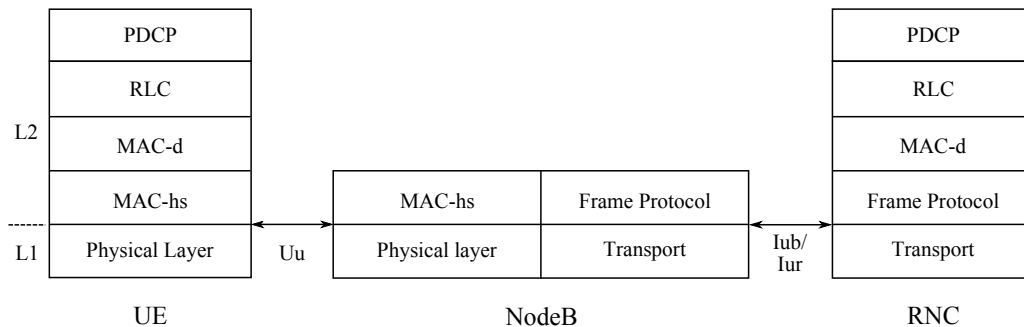


Abbildung 2.3.: HSDPA User Plane Protokollarchitektur [18]

### 2.3.1. Protokollstack der Nutzerebene

Der Protokollstack der HSDPA-Luftschnittstelle definiert die unteren drei Schichten des OSI-Modells, wobei die User Plane die Bitübertragungsschicht (Physical Layer) und die Sicherungsschicht (Data Link Layer) verwendet. Die Vermittlungsschicht (Network Layer) wird nur von der Control Plane verwendet. Die Schicht 2 besteht aus den Teilschichten Medium Access Control (MAC), Radio Link Control (RLC) sowie dem Packet Data Convergence Protocol (PDCP) [19].

PDCP [20] ist die oberste Schicht des Protokollstapels und übernimmt die optionale Kompression und Dekompression von IP-Headern. Die Kompression von IP-Headern ist bei kleinen Datenpaketen wie z.B. Voice over IP (VoIP) interessant, um die Effizienz der Luftschnittstelle zu erhöhen [14]. Allerdings ist die Kompression von Headern in kommerziellen HSPA-Netzwerken nicht verfügbar [21]. In diesem Fall wird kein PDCP-Header benötigt (PDCP-no-header), so dass ein PDCP-PDU einem IP-Datenpaket entspricht.

Die RLC-Schicht [22] kann in den Betriebsarten Transparent Mode (TM), Unacknowledged Mode (UM) sowie Acknowledged Mode (AM) konfiguriert werden. Die Modi TM und UM werden bei zeitkritischen Anwendungen (wie VoIP) bzw. in Fällen verwendet, wo Paketverluste zu keiner Beeinträchtigung des Dienstes führen. Stellt eine Anwendung hohe Anforderungen an die Qualität und Integrität der übertragenen Daten, wird der Modus AM verwendet. Dies trifft insbesondere auf die Datenübertragung mit TCP zu, weswegen im Folgenden vom AM ausgegangen wird. Die Aufgabe des RLC im AM sind die Segmentierung sowie Rekombination der Datenpakete der PDCP-Schicht [16]. Dem RLC-SDU wird ein Header hinzugefügt, der unter anderem eine Sequenznummer sowie eine Kennzeichnung enthält, ob es sich um das letzte PDU eines PDCP-SDU handelt. Anhand dieser Information ist die Rekombination durch den Empfänger möglich.

Die MAC-Schicht [23] im UTRAN besteht aus der MAC-d-Schicht im RNC sowie der MAC-hs-Schicht im NodeB. MAC-d übernimmt das Mapping von logischen Kanälen und Transportkanälen und ist für die Handhabung von Prioritäten verantwortlich. Betreibt

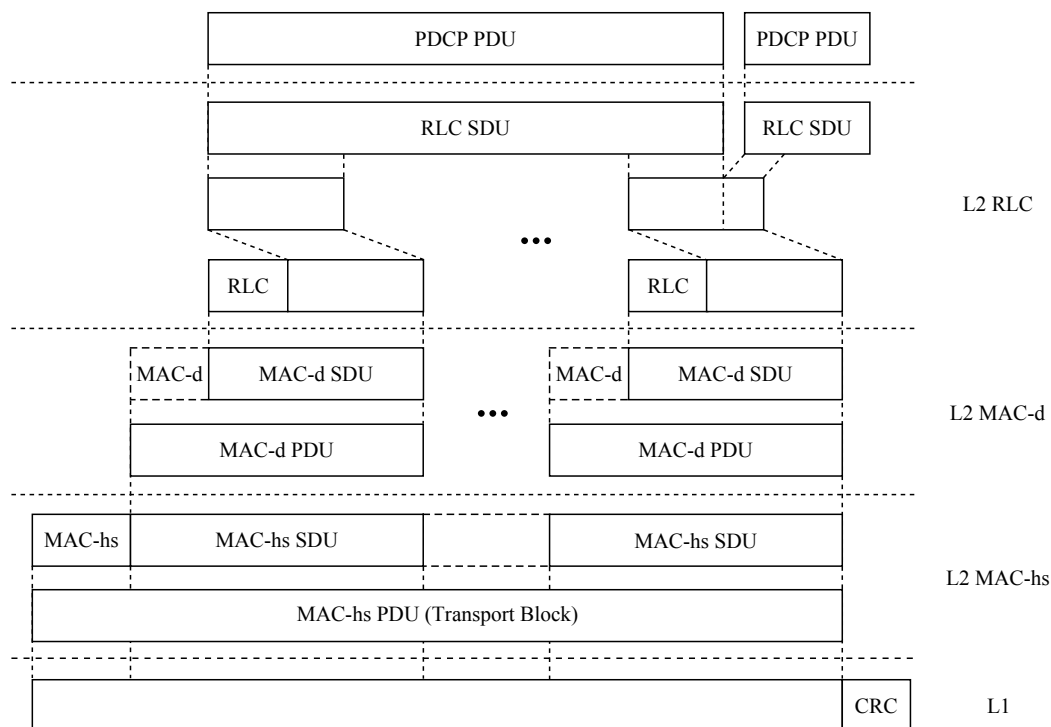


Abbildung 2.4.: Datenfluss zwischen den Protokollschichten [19]

ein Nutzer Anwendungen mit unterschiedlichen Quality of Service-Anforderungen (QoS), wie z.B. Webbrowsing und VoIP-Telefonie, so kann der Datenverkehr dieser Anwendungen auf unterschiedliche logische Kanäle (DTCH) aufgeteilt werden. Der NodeB kann die Datenflüsse beim Scheduling entsprechend behandeln und priorisieren. Da sich in diesem Fall mehrere logische Kanäle einen Transportkanal teilen (Multiplexing), muss dem MAC-d-SDU ein Header vorangestellt werden, über den der jeweilige logische Kanal identifiziert werden kann.

Die unterste Schicht MAC-hs [23] verwaltet die HS-DSCH-Transportkanäle, über die die MAC-hs-PDUs zum Endgerät versendet werden. Ein MAC-hs-PDU, das auch Transportblock genannt wird, besteht aus MAC-hs-SDUs, wobei ein MAC-hs-SDU einem MAC-d-PDU entspricht. Die Reihenfolge der PDUs bleibt beim Zusammenfügen erhalten. Auch die Funktionalität zur schnellen Neuübertragung fehlerhafter Datenpakete (HARQ) ist Teil der MAC-hs-Schicht. Es wird ebenfalls ein Header vorangestellt, der unter anderem eine Sequenznummer enthält.

Ein von einem Server zu einem Endgerät zu übertragendes IP-Paket wird damit auf seinem Weg durch das UTRAN verschiedenen Bearbeitungsschritten unterzogen. Die Daten werden zunächst in der RLC-Schicht segmentiert und mit einem Header versehen. Die nächsttiefere Schicht MAC-d fügt optional einen weiteren Header dazu. Diese MAC-d-PDUs werden von der MAC-hs-Schicht in MAC-hs-PDUs zusammengefasst und zum Endgerät übertragen. Dort laufen diese Verarbeitungsschritte in umgekehrter Reihenfolge ab, bis schließlich das IP-Paket wiederhergestellt ist.

### 2.3.2. Iub-Flusskontrolle und Datenpufferung

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert ist die MAC-Schicht innerhalb des UTRAN räumlich verteilt. Der MAC-d-Teil ist im RNC lokalisiert, die mit HSDPA neu eingeführte MAC-hs-Schicht ist Teil des NodeB. Im RNC wie auch im NodeB gibt es Puffer, in denen die MAC-d-PDUs zwischengespeichert werden. Diese Puffer entkoppeln den Datenverkehr höherer Protokollschichten (wie TCP oder UDP) von den wechselnden Übertragungsgeschwindigkeiten der Luftschnittstelle und garantieren damit eine möglichst hohe Auslastung des Mobilfunkkanals. Des Weiteren werden die Puffer für die in Abschnitt 2.5.3 diskutierten Neuübertragungsmechanismen benötigt [24].

Der Datenaustausch zwischen RNC und NodeB findet über die Iub-Schnittstelle unter Verwendung des in Abbildung 2.3 dargestellten Frame-Protokolls statt. Die MAC-d-PDUs werden dabei über die sogenannten MAC-d-Flüsse (engl. MAC-d flows) von den RLC-Puffern im RNC zu den Priority Queues genannten Puffern des NodeB transportiert. Zu jedem aktiven UE besteht mindestens ein MAC-d-Fluss, dem entweder ein, oder im Fall von Multiplexing mehrere logische Kanäle (DTCH) zugeordnet sind. Bis zu 15 logische Kanäle können mit einem MAC-d-Fluss assoziiert werden [23]. Zu jedem logischen Kanal existiert genau ein RLC-Puffer im RNC. Auf Seite des NodeB wird jedem logischen Kanal genau eine Priority Queue zugeordnet, wobei bis zu acht Priority Queues pro UE angelegt werden können [23]. Jeder Queue wird ein Prioritätslevel im Bereich von 0-15 zugeordnet, der beim späteren Scheduling (siehe Abschnitt 2.5.4) verwendet wird. Durch dieses Konzept können unterschiedliche QoS-Anforderungen berücksichtigt werden.

Die Steuerung der MAC-d-Flüsse obliegt dem NodeB, der über Capacity Allocation Nachrichten MAC-d-Daten beim RNC anfordern kann. Der NodeB muss den Füllstand der Priority Queues so steuern, dass diese weder leerlaufen noch übermäßig viele PDUs enthalten. Bei zu gering gefüllten Queues kann die Luftschnittstelle unter Umständen nicht voll ausgelastet werden, wodurch Ressourcen des Mobilfunkkanals ungenutzt bleiben. Eine zu volle Queue wiederum führt zu hohen Laufzeiten (engl. Round Trip Times, RTT) auf der RLC-Schicht und kann damit diese wie auch höhere Protokollschichten stören. Sofern genügend Daten im Puffer des RNC vorhanden sind, kann davon ausgegangen werden, dass die MAC-d-Flusskontrolle ein Leerlaufen der assoziierten Priority Queue verhindert [25].

## 2.4. RRC-Protokollzustände

In UMTS wie auch HSDPA steuert die im RNC angesiedelte Radio Resource Control (RRC), in welchen RRC-Zuständen sich die angeschlossenen UE befinden und welche Transportkanäle zwischen UTRAN und UE etabliert sind. Die im Folgenden erläuterten Zustände unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Datenübertragungsgeschwindigkeit als auch hinsichtlich der benötigten elektrischen Leistung des Funkmoduls. Höhere Übertragungsgeschwindigkeiten bedingen eine höhere Leistungsaufnahme des Funkmoduls und verkürzen damit die Laufzeit batteriebetriebener Endgeräte. Die Mobilfunkanbieter müssen damit bei der Konfiguration der RRC-Zustandsmaschine zwischen Per-

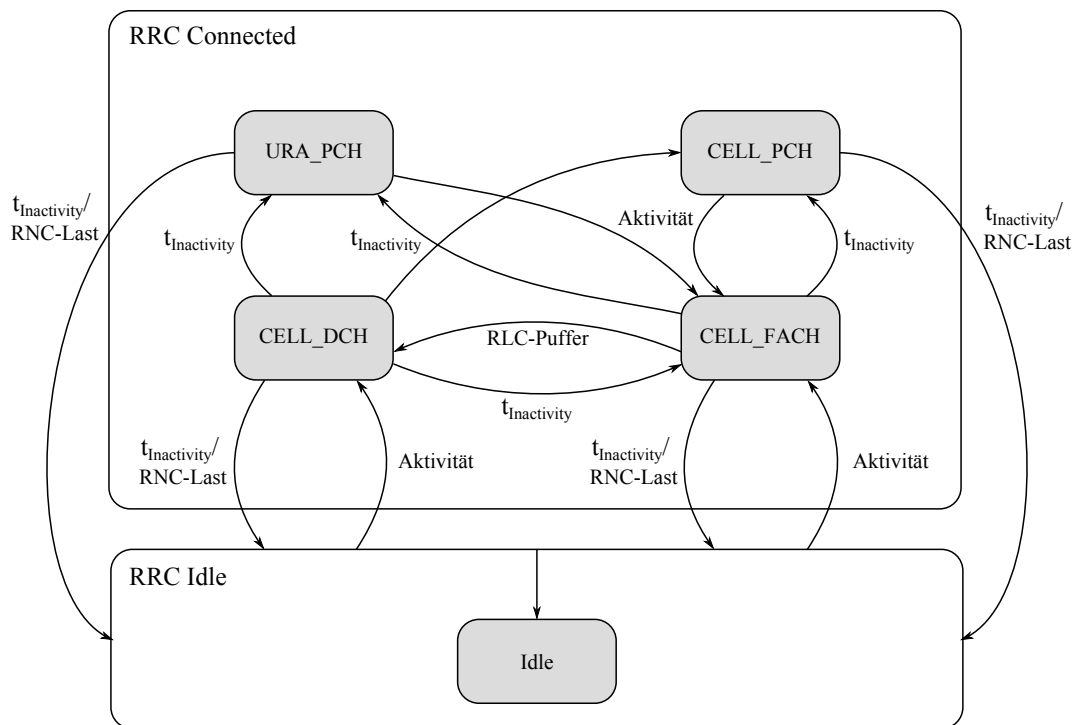


Abbildung 2.5.: RRC-Protokollzustände [28, 14]

formanz, effizienter Nutzung der Radio-Ressourcen und der Leistungsaufnahme auf UE-Seite abwägen [26, 27]

Im Folgenden werden die RRC-Protokollzustände und die Triggerbedingungen zum Zustandswechsel erklärt. Abbildung 2.5 zeigt das vom 3GPP spezifizierte Zustandsdiagramm [28], erweitert um die von [14] angegebenen Triggerbedingungen zum Zustandswechsel.

## Idle

Nach dem Einschalten befindet sich das UE zunächst im Idle-Modus, es ist keine RRC-Verbindung etabliert, eine Übertragung von Nutzdaten ist nicht möglich. Sobald Daten zum UE transferiert werden sollen, wird eine RRC-Verbindung aufgebaut und das UE wechselt in den RRC Connected-Zustand. Innerhalb dieses Zustands gibt es vier Unterzustände: CELL\_FACH, CELL\_DCH, CELL\_PCH und URA\_PCH.

## CELL\_FACH

Im CELL\_FACH-Zustand ist eine Datenübertragung zum UE möglich, aber nur über den gemeinsam genutzten Transportkanal FACH. Trotz der geringen maximal erreichbaren Datenrate von 15 kBaud beträgt die Leistungsaufnahme des Modems in etwa 55 % bis 75 % der Leistungsaufnahme im CELL\_DCH-Zustand [27, 29], weswegen dieser Zustand über längere Zeit vermieden werden sollte [14]. Im Falle von Inaktivität wird der CELL\_FACH unter Berücksichtigung eines Timeouts von 2-10 s verlassen [26].

Ein Wechsel in den CELL\_DCH-Zustand erfolgt, wenn die Pufferbelegung des RNC (RLC-Puffer) einen Schwellwert überschreitet. Dieser Schwellwert liegt zwischen 128 und 1024 Bytes. Die Transition in den CELL\_DCH dauert nach Messungen von [27] 1,3-1,5 s und wird damit durch den Nutzer als Verzögerung bei der Datenübertragung wahrgenommen [26].

## CELL\_DCH

Das UE wird vom CELL\_FACH- in den CELL\_DCH-Zustand überführt, wenn größere Datenmengen übertragen werden sollen, also der Schwellwert der RLC-Pufferbelegung überschritten wird. Dazu wird ein dedizierter Transportkanal (engl. Dedicated Channel, DCH) zwischen UTRAN und UE aufgebaut, im Fall von HSDPA ein HS-DSCH. Verglichen mit den anderen Zuständen ist die Leistungsaufnahme des Modems im CELL\_DCH mit bis zu 800 mW am höchsten [27]. Daher wird dieser Zustand verlassen, sobald für eine gewisse Zeit  $t_{Inactivity}$  (Timeout) keine Daten in dem im RNC befindlichen Puffer vorliegen. Das netzwerkabhängige Timeout liegt nach [14] im Bereich von 2-10 s.

## CELL\_PCH und URA\_PCH

Aus Sicht der Leistungsaufnahme sind CELL\_PCH und URA\_PCH die effizientesten Zustände. Eine Nutzdatenübertragung ist in diesen Zuständen nicht möglich. Bevor Daten gesendet werden können, muss das UE über den Paging Channel (PCH) gesucht werden. Die Suche kann auf Zellebene erfolgen (CELL\_PCH) oder auf Ebene der übergeordneten UTRAN Registration Area (URA\_PCH). Danach wird die Transition in den CELL\_FACH-Zustand vollzogen, die nach [30] ca. 0,35 s benötigt.

Neben den beschriebenen Transitionen innerhalb des RRC Connected-Zustands kann der UE auch in den Zustand Idle zurückversetzt werden. Diese Transition kann durch einen Timeout gesteuert werden oder erfolgen, wenn sich der RNC in einem Zustand hoher Last befindet. Nach Messungen von [26] liegt der Timeout für einen Wechsel von CELL\_FACH zu Idle zwischen 20 s und 63 s und ist damit deutlich höher als die Timeouts bei Zustandswechseln innerhalb von RRC Connected.

Die Messungen von [26, 27] haben gezeigt, dass die Konfiguration der RRC-Zustandsmaschine zwischen den Netzen unterschiedlicher Betreiber variieren kann. Theoretisch können sich sogar die Konfigurationen einzelner Zellen desselben Providers unterscheiden. So ist es beispielsweise konform zur Spezifikation, vom Zustand CELL\_DCH entweder über CELL\_FACH oder aber direkt in CELL\_PCH bzw. URA\_PCH zu wechseln. Explizite Timeout-Werte wurden seitens des 3GPP nicht vorgegeben. Die individuelle Konfiguration einzelner Zellen kann daher nur durch Messungen ermittelt werden.

## 2.5. Datenübertragung über Highspeed-Kanäle

HSDPA basiert technisch auf UMTS Release 99 und den dort spezifizierten Übertragungsmechanismen, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

In Europa verwendet UMTS zwei jeweils 5 MHz breite Kanäle, einen für den Downlink und einen für den Uplink, auf denen gleichzeitig Daten übertragen werden können. Die-

ses Verfahren wird Frequency Division Duplex (FDD) genannt. In anderen Märkten (wie z.B. China) wird nur ein Kanal verwendet, der zeitlich zwischen Downlink und Uplink aufgeteilt wird. Dieses Time Division Duplex (TDD) genannte Verfahren soll im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

### 2.5.1. WCDMA

Bei FDD werden die Ressourcen der beiden Funkkanäle (Downlink und Uplink) durch das Verfahren Wide Code Division Multiplex Access (WCDMA) zwischen den physikalischen Kanälen und damit den aktiven Teilnehmern aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt durch Verwendung der sogenannten Spreizfaktoren (englisch spreading factor, kurz SF), mit denen die Bits der zu übertragenden Daten multipliziert werden. Die Bits des Ergebnisvektors werden als Chips bezeichnet. Da die SF zueinander orthogonal sind, also das Vektorprodukt zweier verwendeter SF gleich 0 ist, können die Datenströme empfängerseitig voneinander getrennt werden. Dieses Verfahren macht es möglich, auf allen physikalischen Kanälen gleichzeitig Daten zu übertragen.

Die SF sind in dem sogenannten Orthogonal Variable Spreading Factors-Codebaum (OVSF-Codebaum) organisiert. Das Wurzelement hat eine Länge von einem Bit, mit jeder weiteren Ebene verdoppelt sich die Zahl  $N$  der Bits und damit die Zahl der orthogonalen SF. Die Zahl  $N$  wird zum Kennzeichnen von SF verwendet. SF 8 beispielsweise bezeichnet einen SF mit 8 Bits, der damit Teil der dritten Unterebene ist. Der Teilbaum unterhalb eines SF ist zu diesem nicht orthogonal, so dass dieser Teilbaum bei Verwendung des übergeordneten SF nicht verwendet werden kann.

Durch die Multiplikation der Datenbits mit dem SF kommt es zu einer Reduktion der erreichbaren Bruttodatenrate, da für die Übertragung eines Datenbits  $N$  Chips benötigt werden. Je kürzer ein SF ist, desto höher ist die Bruttodatenrate, allerdings muss auch die Sendeleistung erhöht werden, da durch die geringere Redundanz weniger Übertragungsfehler erlaubt sind. Wegen dieses Zusammenhangs wird bei UMTS auch von einer leistungsgesteuerten Zuordnung von Ressourcen gesprochen.

Nach dem Spreizen folgt mit dem Scrambling noch ein weiterer Verarbeitungsschritt. Beim Scrambling werden die Daten mit einem Zufallscodex multipliziert. Hiermit soll eine gleichmäßige spektrale Verteilung nach der Modulation erreicht werden. Das Scrambling hat keinen Einfluss auf die Datenrate.

### 2.5.2. Adaptive Modulation und Kodierung

In HSDPA erfolgt die Nutzdatenübertragung durch die physikalischen Kanäle HS-PDSCH. Eine Zelle kann maximal 15 HS-PDSCH verwenden, die jeweils einen SF 16 verwenden. Die verbleibenden Ressourcen des Funkkanals (ein physikalischer Kanal mit SF 16 bzw. mehrere Kanäle mit längerem SF) werden von den Kontrollkanälen, wie z.B. dem HS-SCCH, verwendet. Die Ressourcen des HS-PDSCH werden zwischen allen aktiven UE durch Verwendung eines Zeitscheibenverfahrens aufgeteilt. Eine Zeitscheibe hat eine Dauer von 2 ms und wird auch als Transmission Time Interval (TTI) bezeichnet.

Da die Übertragungsleistung der HS-PDSCH weitestgehend konstant ist [14], wird auf



die wechselnden Empfangsbedingungen der UE mittels adaptiver Modulation und Kodierung reagiert. Wegen der hohen Dynamik der Kanalqualität führt das UE eine permanente Messung der aktuellen Bedingungen durch. Dies beinhaltet Parameter wie das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), Verhältnis aus Empfangsstärke des Pilot-Kanals  $E_c$  zur Rauschleistungsdichte  $N_0$  ( $E_c/N_0$ ) sowie Informationen zu Mehrwegeausbreitung und Interferenz [14]. Aus diesen Daten wird der Channel Quality Indicator (CQI) berechnet, der zwischen 1 (schlechte Empfangsbedingungen) und 30 (exzellente Empfangsbedingungen) liegt. Nach jedem TTI wird der aktuelle CQI-Wert über den HS-DPCCH an den NodeB übertragen und dort nach einem weiteren TTI appliziert. Die Verzögerung zwischen Messung der Kanalbedingungen und Anwendung des CQI beträgt damit 3 TTI [31].

Der NodeB wählt anhand des vom UE gemeldeten CQI eine passende Kombination von Modulation und Kodierung sowie die Anzahl benötigter HS-PDSCH-Kanäle (bzw. WCDMA-Codes) für die Datenübertragung aus. Je besser die Kanalbedingungen sind, desto effizientere Kombinationen können gewählt werden, wodurch mehr Nutzdaten in einem Transportblock (MAC-hs-PDU) übertragen werden können. Bessere Kanalbedingungen führen damit zu einer besseren Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen der Luftschnittstelle.

3GPP hat in [32] Tabellen veröffentlicht, in denen die resultierenden Transportblockgrößen in Abhängigkeit des CQI und der Endgeräteklasse angegeben sind. Die Endgeräteklasse beschreibt, welche Fähigkeiten das UE bzgl. der HSDPA-Datenübertragung hat. Kenngrößen sind unter anderem die Anzahl gleichzeitig empfangbarer HS-PDSCH, die unterstützten Modulationsverfahren sowie die maximale Größe eines Transportblocks. Die Endgeräteklassen sind vom 3GPP in [33] ebenfalls tabellarisch spezifiziert.

Um eine möglichst optimale Ausnutzung der Funkschnittstelle durch effiziente Modulations- und Kodierungsverfahren zu erreichen, werden Paketverluste bei der Übertragung in Kauf genommen. Die MAC-hs-Fehlerrate, die auch Block Error Rate (BLER) genannt wird, darf laut 3GPP 10% nicht übersteigen [32]. Die Arbeiten von [31, 14] gehen von einem Zielwert von genau 10% aus.

### 2.5.3. HARQ

Bedingt durch ständig wechselnde Empfangsbedingungen kann es zu Fehlern bei der Übertragung von Transportblöcken kommen. Bei UMTS Release 99 findet die Fehlerkorrektur nur auf dem RLC-Layer statt, so dass für eine Neuübertragung 80-100ms [15] benötigt werden. Diese Zeit kann mit Hybrid automatic repeat request (HARQ), einer Kombination aus Vorwärtsfehlerkorrektur und Neuübertragung, signifikant verkürzt werden, was positive Auswirkungen auf die Performanz übergeordneter Protokollschichten hat. Die Zeit zur erneuten Übertragung wird von [15] mit 10 ms angegeben, [31] sowie [34] gehen von 6 TTI, also 12 ms, aus. HARQ ist Teil der MAC-hs Protokollschicht.

HSDPA verwendet für die Durchführung von HARQ die sogenannten HARQ-Prozesse. Ein HARQ-Prozess kann als ein mit einer Datenübertragung verknüpfter Zustand verstanden werden. Dieser Zustand enthält unter anderem Informationen über die ID des

assoziierten UE sowie einen Neuübertragungszähler. Nach Empfang und Prüfung eines Transportblocks wird vom UE eine explizite positive oder negative Rückmeldung (ACK/NACK) über den Kontrollkanal HS-DPCCH an den NodeB gesendet. Erst nach dieser Rückmeldung wird der HARQ-Prozess weiterverwendet, entweder für eine erneute Übertragung oder für die Übertragung neuer Daten. Dieses Verhalten wird „Stop and Wait“ (SAW) genannt. Um den Datenkanal trotz SAW auszulasten, verwendet HSDPA mehrere HARQ-Prozesse parallel. Wegen der bereits erwähnten Zeit von 6 TTI bis zur erneuten Übertragung muss ein UE mindestens 6 parallele HARQ-Prozesse unterstützen, um einen kontinuierlichen Datenfluss zu gewährleisten. Maximal 8 Prozesse pro UE werden unterstützt [35].

Wurde ein Datenpaket fehlerhaft empfangen, so wird dieses vom UE nicht verworfen, sondern für spätere Rekombinationszwecke gespeichert. Hierzu werden die Verfahren Incremental Redundancy bzw. Chase Combining verwendet [16, 15]. Nach drei erfolglosen Neuübertragungen wird der HARQ-Prozess wieder freigegeben, und es wird auf die ARQ-Funktionalität der RLC-Schicht zur Neuübertragung zurückgefallen [31].

#### 2.5.4. Scheduling

Die Verteilung der Ressourcen der HSDPA-Luftschnittstelle erfolgt im NodeB durch den sogenannten Scheduler. Der Scheduler entscheidet vor jedem TTI, welchen UEs Ressourcen der Luftschnittstelle zugeordnet werden. Im Falle einer Ressourcenzuteilung werden MAC-d-PDUs aus der jeweiligen Priority Queue entnommen und in Form eines MAC-hs-PDU an den UE geschickt.

Grundsätzlich ist es möglich, bis zu vier UE in einem TTI zu berücksichtigen, indem die verfügbaren HS-PDSCH-Kanäle zwischen diesen aufteilt werden [36]. Dieses als Code-Multiplexing bezeichnete Verfahren macht insbesondere Sinn, wenn UEs aufgrund ihrer Kategorie (siehe Abschnitt 2.5.2) nur wenige Kanäle gleichzeitig verwenden können [30]. Unterstützen die aktiven UE beispielsweise nur fünf Kanäle, das Netzwerk bietet aber 10 Kanäle, so würde ohne Code-Multiplexing permanent die Hälfte der verfügbaren Ressourcen ungenutzt verfallen. Moderne UE, wie z.B. das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Modem (siehe Kapitel 3) unterstützen 15 parallele Kanäle und können damit bei guten Empfangsbedingungen alle verfügbaren HS-PDSCH-Kanäle verwenden. Aus diesem Grund soll Code-Multiplexing im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Der Netzbetreiber steht bei der Konfiguration des Schedulers vor der Herausforderung, eine Balance zwischen der Maximierung des Gesamtdatendurchsatzes der Luftschnittstelle und der Fairness zwischen den aktiven UE finden. In der Vergangenheit wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, die unterschiedliche Regeln bzw. Kriterien für das Scheduling verwenden und damit unterschiedliche Eigenschaften haben. Im Folgenden sollen die gängigsten Konzepte vorgestellt und bzgl. Gesamtdatendurchsatz und Fairness bewertet werden. Eine Übersicht mit Fokus auf HSDPA ist in [37] zu finden.

### Max Rate

Der Max Rate Scheduler vergibt die Ressourcen des nächsten TTI an den UE  $j$  mit der höchsten erreichbaren Datenrate  $r_i$  (Gleichung 2.1).

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq n} (r_i) \quad (2.1)$$

Dieser Scheduler maximiert damit den Gesamtdatendurchsatz der Zelle, benachteiligt aber UE mit schlechten Kanalbedingungen. Es findet also keine gleichmäßige faire Ressourcenverteilung zwischen den UE statt.

### Max C/I

Der Maximum Carrier-to-Interface Ratio (Max C/I) Scheduler verwendet die Kanalqualitäten der aktiven Nutzer als Grundlage. Die Ressourcen des nächsten TTI werden dem UE  $j$  mit dem höchsten CQI zugeordnet (Gleichung 2.2).

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq n} (CQI_i) \quad (2.2)$$

Wegen der Abhängigkeit von CQI und erreichbarer Datenrate maximiert dieser Scheduler ebenfalls den Gesamtdurchsatz und nimmt keine faire Ressourcenverteilung vor.

### Round-Robin

Der Round-Robin (RR) Scheduler weist den aktiven UE die Ressourcen zyklisch in einem Rundlaufverfahren zu. Dazu werden die aktiven UE in einer Warteschlange arrangiert. Nachdem dem ersten UE der Warteschlange die Ressourcen zugeordnet wurden, wird es am Ende der Warteschlange wieder eingereiht. Es werden keine Eigenschaften wie historische Datendurchsätze oder Kanalqualitäten (CQI) berücksichtigt. Bezogen auf eine Runde verteilt der Round-Robin Scheduler die Ressourcen damit gleichmäßig an die aktiven UE.

### Proportional-Fair

Der Proportional Fair (PF) Scheduler wurde initial von [38] für Code Division Multiple Access (CDMA) vorgeschlagen und von [39] an die Verwendung für HSDPA angepasst. Gemäß Gleichung 2.3 werden die Ressourcen des nächsten TTI  $k$  dem UE  $j$  zugeteilt, dessen Quotient aus aktuellem Datendurchsatz  $r_i$  und dem mittleren Datendurchsatz  $\bar{r}_{ei}$  maximal ist.

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq n} \left( \frac{r_i(k)}{\bar{r}_{ei}(k)} \right) \quad (2.3)$$

$$\bar{r}_{ei}(k+1) = \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \cdot \bar{r}_{ei}(k) + \frac{1}{T_c} \cdot r'_i(k) \quad (2.4)$$

Der mittlere Datendurchsatz  $\bar{r}_{ei}$  errechnet sich als exponentiell gleitender Durchschnitt unter Verwendung der Filterkonstante  $T_c$  (Gleichung 2.4).  $r'_i$  ist der tatsächliche Datendurchsatz des TTI  $k$ ; dieser Wert ist 0 für alle UE, die nicht bedient wurden.

Wie der RR-Scheduler teilt auch der PF-Scheduler die Ressourcen fair zwischen den aktiven UE auf. Allerdings erreicht der PF-Scheduler verglichen mit dem RR-Scheduler einen höheren Gesamtdatendurchsatz und ist deshalb das überlegenere Konzept [37].

### Hybride Konzepte

Hybride Konzepte vereinigen die Verfahren mehrerer Scheduler und erreichen so eine Kombination der jeweiligen Eigenschaften. In der Arbeit von [40] wird im Hybrid Proportional Fair (PF-H) Ansatz das PF- mit dem Max C/I-Konzept kombiniert. Diese Kombination resultiert, verglichen mit dem PF-Scheduler, in einem erhöhten Gesamtsystemdurchsatz, erreicht aber eine höhere Fairness als das Max C/I-Konzept.

Ein weiterer hybrider Ansatz ist der von [37] vorgeschlagene Channel Quality-Based Minimum Throughput Assurance (CQ-BMTA) Scheduler. Dieser Scheduler kombiniert die aktuelle Kanalqualität mit den durchschnittlichen Datendurchsätzen und garantiert so jedem aktiven UE einen Mindestdatendurchsatz.

## 2.6. Zellwechsel

Mobilfunknetze sind bezüglich der geografischen Funknetzabdeckung in sogenannte Zellen eingeteilt, wobei jede Zelle ein gewisses geografisches Gebiet abdeckt. Sobald sich mobile Endgeräte bewegen und dabei die Grenze zwischen zwei benachbarten Zellen überqueren, findet ein Wechsel des UE in die neue Zelle statt. Die auch als Handover bezeichneten Zellenwechsel stellen damit sicher, dass der UE immer unter bestmöglichen Kanalbedingungen mit dem Mobilfunknetz verbunden ist [16].

Eine Zelle kann in Sektoren unterteilt sein, wobei jeder Sektor einen Teil des Zellgebiets abdeckt. Eine häufige Konfiguration ist eine Aufteilung in drei Sektoren durch Verwendung von Dreisektor-Antennen. Die Antennen sind hierbei im Winkelabstand von 120° zueinander angeordnet. Alle Sektoren einer Zelle werden von derselben Basisstation (NodeB) betrieben. Die Begriffe Zelle und Sektor werden im Folgenden synonym verwendet.

Mit UMTS Release 99 wurde das sogenannte Soft Handover eingeführt, das einen unterbrechungsfreien Zellwechsel gestattet. Ein UE ist hierzu während Zellwechsels mit mehreren Zellen bzw. Sektoren gleichzeitig verbunden und empfängt von diesen Daten. Auf diese Weise ist die Kommunikationsverbindung zu keiner Zeit unterbrochen. Die Handover-Entscheidungen werden dabei vom RNC auf Basis von Signalstärkemessungen getroffen [15].

In HSDPA hingegen ist das UE im CELL\_DCH-Zustand immer nur mit einer Zelle über den HS-DSCH verbunden, ein Soft Handover analog zu UMTS kann daher nicht durchgeführt werden. In [30] wird dies mit der hohen Komplexität der Synchronisation der Datenübertragung über verschiedene Zellen begründet. In HSDPA Release 5 werden Zellwechsel grundsätzlich vom Mobilfunknetz auf Basis von Kanalqualitätsmessungen des UE gesteuert, höhere Releases erlauben auch durch UE initiierte Zellwechsel [36].

3GPP unterscheidet zwischen Intra-NodeB- und Inter-NodeB-Zellwechseln. Bei den Intra-NodeB-Zellwechseln werden Quell- und Zielzelle von dem selben NodeB gesteuert, es fin-

det also nach obiger Definition ein Wechsel des Sektors statt. Bei Inter-NodeB-Zellwechseln hingegen werden Quell- und Zielzelle von verschiedenen NodeBs betrieben.

Die wesentlichen Schritte eines Handovers sollen am Beispiel eines Inter-NodeB-Zellwechsels beschrieben werden [14, 36]: Sobald die Entscheidung zum Zellwechsel getroffen wurde, reserviert der RNC die nötigen Ressourcen des Ziel-NodeB. Nach Abschluss der Ressourcenreservierung wird dem UE von RNC eine Nachricht zur Rekonfiguration der Funkkanäle zuesendet. Der UE, der immer noch mit der Quellzelle verbunden ist, wechselt daraufhin zum Ziel-NodeB. Nachdem die Verbindung des UE von der Quellzelle getrennt wurde, entfernt der dortige NodeB alle gepufferten MAC-d-PDUs aus den Priority Queues und löscht alle assoziierten HARQ-Prozesse. Der Ziel-NodeB muss nun seinerseits MAC-d-PDUs über die Iub-Schnittstelle beim RNC anfordern, um mit der Datenübertragung über den HS-DSCH beginnen zu können. Zur reibungslosen Wiederherstellung der Verbindung kann der UE eine RLC Statusnachricht an den RNC senden, woraufhin zunächst die in den Priority Queues des Quell-NodeB verbliebenen MAC-d-PDUs zum Ziel-NodeB übertragen werden. Im Gegensatz zum nahtlosen Soft-Handover von UMTS findet bei HSDPA eine kurze Unterbrechung der Datenübertragung statt. Die Unterbrechungsdauer beträgt ca. 200-250 ms.

Der Ablauf eines Intra-NodeB-Zellwechsels läuft analog ab, allerdings können die Inhalte der Priority Queues sowie die Status der HARQ-Prozesse weiterverwendet werden. Ein erneutes Anfordern von MAC-d-PDUs beim RNC kann entfallen.

Die Identifikation einer Zelle kann grundsätzlich über den Mobile Network Code (MNC), den Mobile Country Code (MCC), den Location Area Code (LAC) sowie die ID der Zelle (Cell ID) erfolgen. Nach [41] kann alternativ der Primary Scrambling Code (PSC) verwendet werden. Der PSC erlaubt 512 unterschiedliche Kombinationen und eignet sich daher für die eindeutige Identifikation einer Zelle in einem begrenzten geografischen Gebiet.

## 2.7. TCP über HSDPA: Der Bufferbloat-Effekt

Um eine Überlastung der Kommunikationsstrecke zwischen Sender und Empfänger zu verhindern, verwendet TCP den sogenannten Congestion Control Algorithmus [42]. Sobald ein Paketverlust erkannt wurde, wird die Übertragungsgeschwindigkeit zurückgesetzt. Die Erkennung von Paketverlusten ist über Timeouts realisiert, die beim Absenden eines Datenpakets gesetzt werden. Sofern innerhalb des Timeouts keine Quittung vom Empfänger eingeht, wird das entsprechende Paket als verloren gewertet.

Paketverluste treten üblicherweise an Netzknoten wie Routern auf. Wenn die eingangsseitigen IP-Paketpuffer voll sind, müssen neu eingehende Daten verworfen werden. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben sind innerhalb eines HSDPA-Netzes am RNC sowie im NodeB Puffer installiert, in denen eingehende Daten vor dem Versenden über die Luftschnittstelle abgelegt werden. Diese Pufferung führt in Verbindung mit den Neuübertragungsmechanismen (siehe Abschnitt 2.5.3) dazu, dass innerhalb des Mobilfunknetzes quasi kein Paketverlust auftritt [24].

Übertragen auf TCP bewirkt dies, dass der Congestion Control Algorithmus nahezu

wirkungslos wird. Der TCP-Stack versendet kontinuierlich neue Pakete, die im Mobilfunknetz zwischengespeichert werden. Als Resultat steigt die TCP RTT signifikant an. Dieser Effekt des „Aufblähens“ vorhandener Pufferkapazitäten wird als Bufferbloat-Effekt bezeichnet [43].

Die Messungen von [24, 44] haben gezeigt, dass insbesondere HSDPA-Netze in Verbindung den TCP Varianten BIC und CUBIC vom Bufferbloat-Effekt betroffen sind. Neben dem Ansteigen der TCP RTT führt der Effekt zu einer Beeinflussung konkurrierender IP-Datenflüsse. Wenn ein langlebiger Datenfluss, wie beispielsweise der Download einer großen Datei, bereits zu einem hohen Pufferfüllstand geführt hat, kommt es bei überlagerten kurzlebigen Datenflüssen wie dem Abruf einer Website zu signifikanten Verzögerungen. Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass seitens des Mobilfunkbetreibers nur ein DTCH und damit gemäß Abschnitt 2.3.2 ein RLC-Puffer und eine Priority Queue pro aktiven UE konfiguriert ist. Diese teilen sich alle IP-Datenflüsse eines Teilnehmers, Pakete kurzlebiger Datenflüsse werden in den bereits gefüllten Puffer eingereiht.

Neben den beschriebenen negativen Effekten kann der Bufferbloat-Effekt auch verwendet werden, um festzustellen, ob sich die Luftschnittstelle an der Kapazitätsgrenze bewegt. Der Anstieg der TCP RTT indiziert, dass die Datenpuffer ausreichend gefüllt sind und der Datendurchsatz durch die Kapazität der Luftschnittstelle sowie die Ressourcenverteilung durch den Scheduler bestimmt wird. Der Datenfluss ist nun weitgehend entkoppelt von den TCP-Steuerungsmechanismen.

### 3 CQI-Map

Konnektivitätskarten (engl. Connectivity-Maps) bieten die Möglichkeit, für geografische Punkte oder Gebiete Daten zur Qualität bzw. zu einzelnen Parametern des Mobilfunknetzes abzurufen. Ein Beispiel hierfür sind die von den Mobilfunkanbietern im Internet angebotenen Netzabdeckungskarten, über die sich Kunden über die Verfügbarkeit sowie die zu erwartenden Geschwindigkeiten an einem Standort informieren können. Ein ähnliches Angebot stellt die Plattform OpenSignal [45] bereit, wobei die Karte durch Crowdsourcing, also aus den von freiwilligen Nutzern bereitgestellten Daten, erstellt wird.

Während die oben genannten Beispiele für Connectivity-Maps den Fokus auf die Verfügbarkeit von Mobilfunknetzen bzw. -technologien legen, werden zur Unterstützung von mobilen Anwendungen in der Regel detailliertere Informationen benötigt. Dies können z.B. Informationen über die zu erwartenden Datendurchsätze [46, 8] oder über die Lage von Handover-Positionen sein [8]. Auf Basis dieser Informationen können mobile Anwendungen Strategien entwickeln, um durch a priori Wissen über die zu erwartenden Eigenschaften des Mobilfunknetzes die Qualität der angebotenen Dienste proaktiv zu verbessern.

Die in der Connectivity-Map angebotenen Informationen werden aus historischen, im Rahmen von Messungen aufgezeichneten Daten gewonnen. Hierzu werden die einzelnen im Feld aufgenommenen Rohdatensätze an zentraler Stelle ausgewertet und durch Aggregation bzw. Filterung zusammengefasst. Neben Messungen der Eigenschaften des Mobilfunknetzes wird die zugehörige geografische Position benötigt, um die räumliche Zuordnung durchführen zu können. Nur so ist der Aufbau einer Karte für ortsbezogenen Datenabfragen möglich.

Gegenüber Fußgängern, Luftfahrzeugen oder Schiffen ist die Bewegung von Automobilen in der Regel auf das Straßennetz beschränkt. Diese Restriktion kann sowohl bei der Erstellung als auch bei Abfragen an die Karte berücksichtigt werden, indem geografischen Positionen durch Abgleich mit einer Straßenkarte (engl. Map Matching) ein Ort im Straßennetz zugeordnet wird.

Im Folgenden werden die Schritte zur Erzeugung einer Connectivity-Map beschrieben, die sich, speziell für HSDPA, auf den in Abschnitt 2.5.2 erklärten CQI fokussiert. Diese im Folgenden CQI-Map genannte Karte [47] erlaubt die ortsbezogene Abfrage der zu erwartenden CQI-Werte, über die der maximal erreichbare Datendurchsatz auf IP-, TCP- sowie Applikationsebene berechnet werden kann. Dieser Zusammenhang, für den entsprechende Formeln angegeben werden, wird abschließend durch Vergleich der für die jeweiligen CQI-Werte erreichten mit den maximal möglichen Datendurchsätzen validiert.

### 3.1. Verwandte Arbeiten

Im Folgenden werden Arbeiten aufgeführt, die sich mit der Erfassung von Konnektivitätskarten sowie deren Verwendung befassen. Dabei kommt es häufig zu einer missbräuchlichen Verwendung des Begriffs „Bandbreite“. In der Nachrichtentechnik bezeichnet Bandbreite den Frequenzbereich, in dem die Daten als elektrische Signale vom Sender zum Empfänger übertragen werden. Die Menge an Daten, die in einem Zeitintervall übertragen wird, wird als Datenrate bzw. Datendurchsatz bezeichnet. Während sich der Datendurchsatz auf die Nutzdaten bezieht (Nettodatenrate), bezieht die Datenrate den Protokoll-overhead ein (Bruttodatenrate). Im Folgenden ist mit Bandbreite der Datendurchsatz im Downlink gemeint.

Ähnlich der Plattform OpenSignal [45] schlägt [48] eine Smartphone-Applikation vor, mit der Parameter des Mobilfunknetzes gesammelt werden können. Es wird ein Crowdsourcing-Ansatz verfolgt, das Sammeln der Daten erfolgt durch freiwillige Nutzer. Bei den Daten handelt es sich neben Informationen zum verwendeten Mobilfunknetz um die Signalstärke sowie die erreichte Bandbreite, die zusammengefasst und mit einer geografischen Koordinate versehen werden. Aus diesen Daten können Konnektivitätskarten erstellt werden, die wie in dieser Dissertation vorgeschlagen als a priori Wissen zur Verbesserung der Qualität mobiler Dienste eingesetzt werden sollen. Allerdings werden weder Details zur Erzeugung der Karte angegeben, noch wird ein konkreter Anwendungsfall vorgeschlagen und untersucht. Die Veröffentlichung fokussiert sich auf das vorgeschlagene Verfahren zur Schätzung des Datendurchsatzes, das experimentell verifiziert wird.

Die Arbeit [49] befasst sich mit der energieoptimierten Verwendung des Mobilfunkkanals auf der Seite des Endgeräts am Beispiel von Mobiltelefonen. Hintergrund ist, dass für die Kommunikation über einen Mobilfunkkanal mehr Energie benötigt wird, wenn das Empfangssignal schwach ist. In diesem Fall muss einerseits mit einer höheren Leistung gesendet bzw. empfangene Signale verstärkt werden, andererseits ist bei einem schwachen Empfangssignal eine niedrigere maximal erreichbare Datenrate zu erwarten, so dass mehr Zeit und damit Energie für einen Übertragungsvorgang benötigt wird. Es wird daher ein Verfahren vorgeschlagen, das fokussiert auf den Downlink die Datenübertragung so steuert, dass möglichst wenig Energie aufgewendet werden muss. Unter Berücksichtigung von Deadlines werden Daten möglichst zu Zeitpunkten hoher Signalstärke übertragen. Aus Gründen der Gesamtenergiebilanz kann zur Lokalisierung kein GPS-Empfänger verwendet werden, sondern es findet ein Abgleich des gemessenen Signalstärkeverlaufs sowie der Zell-IDs mit lokal im Endgerät hinterlegten historischen Daten eines festen Bewegungspfads statt. Es wird keine georeferenzierte Karte verwendet. Die zur Planung der Übertragungen benötigte Prädiktion des Signalstärkeverlaufs erfolgt bis zu 800 s in die Zukunft, wobei es ab einer Prädiktionsdauer von 20 s zu keiner signifikanten Zunahme des Fehlers kommt. Diese Angaben erscheinen gerade im Bereich des straßengebundenen Verkehrs, der von einer hohen Dynamik der fahrbaren Geschwindigkeiten geprägt ist, als sehr optimistisch.

In der Dissertation [9] wurde eine sogenannte Bandbreitenkarte für zwei populäre Pend-



lerrouten im Gebiet von Sydney, Australien, erstellt. Dabei wurden zwei HSPA-Netze sowie ein iBurst-Netz berücksichtigt. Die Messung der Bandbreiten erfolgte mit einer selbst entwickelten Software unter Verwendung frei verfügbarer Hardwarekomponenten. Innerhalb des achtmonatigen Messzeitraums wurden 75 Messfahrten durchgeführt. Die gesammelten Daten wurden aggregiert und zu Segmenten fester Länge verarbeitet, die jeweils 500 m einer Route abdecken. Es werden zwei Anwendungen vorgestellt, die sich das a priori Wissens der Bandbreitenkarten zu Nutze machen. Ein proaktives adaptives Videostreaming passt die aktuelle Streaming-Rate an die zu erwartenden Datendurchsätze an. Als zweite Anwendung wird das Scheduling in einem mobilen Router optimiert, der über mehrere mobile Datenverbindungen mit dem Internet verbunden ist. Die Wahl der zu verwendenden Datenverbindung erfolgt ortsabhängig anhand der historischen Datendurchsätze.

In [46] wird ähnlich der vorher erwähnten Arbeit ein adaptives Videostreaming durch Verwendung einer Prädiktion der zu erwartenden Datendurchsätze verbessert. Ein zentraler Server sammelt und aggregiert die georeferenzierten Datendurchsatzmessungen der mit einem 3G-Netzwerk verbundenen Endgeräte und stellt hierauf basierend einen Dienst zur Abfrage des zu erwartenden Datendurchsatzes für geografische Positionen bereit. Anhand dieser prädizierten Datendurchsätze können die zu verwendenden Qualitäten bzw. Streaming-Raten der Videowiedergabe proaktiv geplant werden. Da neben straßengegebenen auch schienengebundene und maritime Routen Verwendung finden, ist im Gegensatz zu dieser Arbeit keine Assoziierung der Daten zum Straßennetzwerk, also kein Map Matching, implementiert.

Die Arbeit [50] verwendet Abdeckungskarten (engl. Coverage Maps), um ein intelligentes proaktives Verfahren zum Wechsel zwischen den Technologien UMTS und IEEE 802.11x zu ermöglichen. Auf Basis der Karten werden aus Sicht der Konnektivität geeignete Routen durch das erfasste Gebiet berechnet. Diese Routen enthalten neben geografischen Informationen die Sequenz der Netzwerke, die während der Fahrt zu wählen ist. Als Indikator für den zu erwartenden Datendurchsatz wird lediglich die Signalstärke herangezogen, wobei die Annahme getroffen wird, dass ein Rauschen mit nahezu konstanter Leistung vorliegt. In diesem Fall kann aus einer höheren Signalstärke auf ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis geschlossen werden, wodurch effizientere Modulationsverfahren eingesetzt werden können. Diese effizienteren Modulationsverfahren erlauben einen höheren Datendurchsatz. Im Falle von HSDPA ist die Signalstärke nach Abschnitt 2.5.2 allerdings nur ein Parameter, der bei der Bestimmung der Kanalqualität (CQI) und damit des erreichbaren Datendurchsatzes verwendet wird.

In [8, 51] wird ein detaillierter Einblick in die Erzeugung von Konnektivitätskarten gegeben. Es wird ein Messverfahren vorgestellt, mit dem Parameter des Mobilfunknetzes sowie die assoziierten Datendurchsätze auf IP-, TCP- sowie Applikationsebene gemessen werden können. Diese georeferenzierten Daten werden aggregiert und dem Straßennetz zugeordnet. Die Segmentlänge entspricht der Länge der jeweiligen Straßennetzwerkkannten, wobei eine maximale Länge definiert ist, anhand derer überlange Segmente geteilt

werden. Basierend auf der Konnektivitätskarte werden Verfahren vorgeschlagen, um Eigenschaften bzw. Charakteristika des 3G-Netzes zu präzisieren. Bei diesen Eigenschaften handelt es sich um zu erwartende Zellwechsel, zukünftige Signalstärken sowie der minimal zu erwartende Datendurchsatz und die maximal zu erwartende Latenz. Anhand der Prädiktion der Zellwechsel wird in [52] ein Verfahren vorgestellt, um das Inter-System Handover, also den Wechsel von einer Mobilfunktechnologie in eine andere, zu optimieren. Das im Folgenden vorgestellte Verfahren zur Erzeugung der CQI-Karte basiert auf dieser Arbeit, fokussiert sich aber auf den CQI, der zwar aufgezeichnet, aber nicht verwendet wurde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den referenzierten Arbeiten indirekte Messungen der Leistungsfähigkeit der drahtlosen Netzwerke durchgeführt wurden. Diese Arbeit hingegen wird mit dem CQI einen Parameter verwenden, der einen direkten Rückschluss über die Qualität der Luftschnittstelle und damit die maximal zu erwartenden Datendurchsätze erlaubt.

## 3.2. Erzeugung der Karte

Zur Erzeugung der CQI-Karte sind folgende Schritte notwendig, die im Folgenden detailliert erklärt werden:

1. Erfassung der Rohdaten durch Messfahrten
2. Zuordnung der Rohdaten zum Straßennetzwerk durch Map Matching
3. Aufteilung der CQI-Daten in Segmente
4. Erstellung der neuen Kartenattribute

### 3.2.1. Erfassung der Rohdaten

Die Erfassung der Rohdaten fand auf zwei Strecken im Raum Braunschweig statt, wobei jeweils 24 Runden gefahren wurden. Während Strecke 1 durch innerstädtisches und ländliches Gebiet führt und dabei Landstraßen und Autobahnen enthält, handelt es sich bei Strecke 2 um eine rein innerstädtische Strecke. Tabelle 3.1 fasst die Eigenschaften beider Strecken zusammen.

Eigenschaften	Strecke 1	Strecke 2
Länge (km)	12,2	5,3
Anzahl Rohdatensätze	20.168	11.847
Datenvolumen auf IP-Ebene (MiB)	6.165,22	2.950,74
Autobahn (A), Landstraße (L), Innerstädtisch (I)	A,L,I	I

Tabelle 3.1.: Übersicht über die Teststrecken

Während der Messfahrten wurde eine 5 GB große Datei vom Fileserver der Technischen Universität Braunschweig via HTTP heruntergeladen. Der hierdurch generierte TCP/IP-

Datenverkehr versetzt das Modem während der Fahrt dauerhaft in den CELL\_DCH-Zustand, wodurch eine Messung der CQI-Werte möglich ist.

Der Messaufbau wurde in den Arbeiten von [8, 51] vorgestellt und weicht bei den Hardwarekomponenten lediglich bzgl. des verwendeten GPS-Empfängers ab. Anstelle des  $\mu$ Blox EVK-6H wurde das Vorgängermodell  $\mu$ Blox EVK-5H verwendet. Tabelle 3.2 zeigt die verwendeten Komponenten:

	<b>Modell</b>	<b>Eigenschaften</b>
GPS-Empfänger	$\mu$ Blox EVK-5H	Betrieb ohne Korrekturdienste Genauigkeit: 2,5 m CEP <sup>1</sup>
Mobilfunk-Modem	Sierra Wireless AIRPRIME MC7710	unterstützt HSPA+ und LTE HSDPA-Kategorie: 24
Antenne	Hirschmann GPS 1890	Kombinantenne für GPS und Mobilfunk mit Magnetfuß
Laptop	Dell D830	Betriebssystem Debian Linux, Kernel: 2.6.32-5-686

Tabelle 3.2.: Hardware-Komponenten des Messaufbaus

Softwareseitig werden mit 1 Hz die relevanten Daten abgefragt und in Kombination mit Zeitstempeln in Textdateien gespeichert. Die Daten können in drei Kategorien eingeteilt werden: i) Daten zur aktuellen geografischen Position und Bewegung, ii) die Messwerte des Mobilfunk-Modems sowie iii) die auf Betriebssystemebene gemessenen Datendurchsätze.

Der GPS-Empfänger liefert mit 1 Hz aktuelle Informationen zur geografischen Position sowie zur Bewegungsgeschwindigkeit und -richtung in Form von NMEA 0183-Datensätzen [53]. Die geografische Position wird im World Geodetic System 1984 (WGS 84), einem weltweit gültigen ellipsoiden Koordinatensystem, in Form von geografischer Breite (Latitude), geografischer Länge (Longitude) sowie einer Höhe (Altitude) angegeben. Das WGS 84-System findet auch bei der Referenzierung von Punkten in den verwendeten digitalen Straßenkarten (siehe Abschnitt 3.2.2) Anwendung. Neben der geografischen Position stellt der GPS-Empfänger die Geschwindigkeit über Grund sowie die Bewegungsrichtung bezogen zur Nordrichtung bereit. Letzterer wird auch als Kurswinkel (engl. Heading) oder Azimut bezeichnet.

Die Kommunikation mit dem Mobilfunk-Modem ist über AT-Kommandos [54] realisiert. Über AT-Kommandos können Zustände bzw. Parameter des Modems abgefragt werden, beispielsweise zur aktuell verwendeten Mobilfunktechnologie oder zur Netzwerkregistrierung. Der Hersteller Sierra Wireless hat ergänzend zu dem Kommandosatz des 3GPP eigene Kommandos definiert und ermöglicht so den Zugriff auf weitere modeminterne Daten. Im Rahmen dieser Arbeit wird das modemspezifische Kommando AT!CQI?

<sup>1</sup>CEP: Circular Error Probability, 50% der Messwerte liegen innerhalb des angegebenen Radius um die wahre Position.

verwendet, um im HSDPA-Modus den CQI-Wert abzufragen. Der CQI wird als ganzzahliger Wert geliefert und gibt den Durchschnitt während des Messintervalls, also seit dem letzten Aufruf, an. Diese Erweiterung stellt die einzige softwareseitige Modifikation bzgl. [8, 51] dar.

Die Messungen des Datendurchsatzes findet auf IP-, TCP- sowie Applikationsebene durch Verwendung der entsprechenden Programmierschnittstelle des Linux-Betriebssystems statt. Zusätzlich werden die TCP RTT unter Verwendung der TCP Timestamps Option [55] erfasst.

Vor dem nächsten Verarbeitungsschritt werden die Daten aus den einzelnen Textdateien ausgelesen, über die Zeitstempel miteinander assoziiert und als aggregiertes Objekt in eine Datenbank geschrieben.

### 3.2.2. Map Matching der erfassten Daten

Das Map Matching ist der zweite Schritt in der Verarbeitung der Rohdaten zu einer CQI-Karte. Die Aufgabe des Map Matchings besteht darin, die einzelnen, über WGS 84-Koordinaten georeferenzierten Messpunkte dem Straßennetz zuzuordnen. Dabei wird die Randbedingung zugrunde gelegt, dass der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Verkehr ausschließlich straßengebunden stattfindet.

Vor Erklärung des verwendeten Algorithmus soll zunächst ein Einblick in den Aufbau von digitalen Straßenkarten gegeben werden. Dabei werden die für Navigationszwecke benötigten Vektorkarten vorgestellt, darstellungsorientierte Karten wie Rasterkarten werden nicht betrachtet.

Digitale Straßenkarten bilden die Basis aller heutiger Navigationsfunktionen wie beispielsweise die Suche einer Adresse, die Berechnung einer Route oder die Führung zum Zielpunkt. Der Aufbau der Karte orientiert sich dabei an den Anforderungen der jeweiligen Funktion. Während die Adresssuche einen Index zur Abfrage der verfügbaren Orts- und Straßennamen benötigt, erfordert eine schnelle Routenrechnung, dass die Verknüpfungen der Straßen, also Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen, verfügbar sind. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das in aktuellen Navigationssystemen eingesetzte neue Kartenformat Navigation Data Standard (NDS) [56], lassen sich aber bzgl. des Konzeptes auf andere Kartenformate übertragen.

Das NDS-Format (kurz NDS) strukturiert die Kartendaten in sogenannte Building Blocks. Ein Building Block unterstützt dabei eine oder mehrere Navigationsfunktionen, indem die Daten jeweils optimal für den jeweiligen Zweck aufgearbeitet werden. Der Building Block „Basic Map Display“ bietet beispielsweise schnellen Zugriff zum Zeichnen der Karteninhalte, ist aber für eine Adresssuche völlig ungeeignet. Hierfür bietet hingegen der „Name Building Block“ entsprechend optimierte Indizes an.

Der Routenrechner wie auch der Map Matcher benötigt das Straßennetz in einer navigierbaren Form, also mit entsprechenden Verknüpfungen zwischen den einzelnen Straßen. Diese Daten stellt NDS im „Routing Building Block“ bereit.

Das Straßennetz wird durch zwei Hauptbestandteile beschrieben, den Knoten sowie den Kanten. Knoten werden im NDS Intersections, Kanten werden Links genannt. Die Kno-

tenpunkte liegen am Anfang sowie am Ende der Kanten und enthalten Informationen zur Topologie des Straßennetzes. Innerhalb eines Knotens sind die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen zwischen den Kanten hinterlegt. Die Kanten enthalten Informationen zu der assoziierten Straße sowie die geometrischen Informationen. Die im Rahmen der verwendeten NDS-Karte liegen die Kantengeometrien als Liste von WGS 84-referenzierten Geometriestützstellen vor. Die Spezifikation erlaubt zudem die Verwendung von Klothoiden, was aber keine Anwendung findet.

Die an den Kanten verfügbaren Informationen zu der assoziierten Straße werden Attribute genannt und unterteilen sich in obligatorische sowie optionale Attribute. Zu den obligatorischen Attributen, die auch fixe Attribute genannt werden, gehören unter anderem die Straßenklasse, die Länge sowie die erlaubte Fahrtrichtung (unidirektional oder bidirektional). Über die optionalen Attribute, flexible Attribute genannt, kann die Karte mit weiteren Informationen angereicht werden, beispielsweise mit Krümmungen von Kurven, Steigungswerten oder den bei LKW-Navigation relevanten Durchfahrtsbreiten und -höhen.

Abbildung 3.1 zeigt den Aufbau einer NDS-Straßenkarte am Beispiel einer komplexen Kreuzung in Braunschweig. Bedingt durch Kreuzungen mit anderen Straßen, aber auch durch Änderungen in der Attributierung, besteht eine logische Straße zumeist aus mehr als einer Kante, die untereinander durch Knoten verbunden sind. Eine Kante beschreibt dabei grundsätzlich eine Fahrbahn, also einen zusammenhängenden, befestigten Teil der Straße. Sobald bauliche Maßnahmen wie eine Mittelleitplanke oder ein Grünstreifen die Richtungsfahrbahnen trennen, werden diese Teile der Straße in separaten Kanten erfasst. Dies ist in Abbildung 3.1 bei der gelb gezeichneten Hauptstraße südlich der komplexen Kreuzung der Fall, aber auch die Kreuzung selber ist durch eine Vielzahl von Kanten modelliert.

Die Aufgabe des Map Matchers besteht darin, das Wertepaar {Fahrzeugposition, Bewegungsrichtung} einer Kante im digitalen Straßennetz zuzuordnen. Neben der Kante selber wird noch die Durchfahrtsrichtung (engl. Direction) sowie der Versatz zum Start der Kante (Offset) bestimmt. Die Abbildungsvorschrift lautet demnach:

$$f : \{Position, Heading\} \rightarrow \{Link, Direction, Offset\} \quad (3.1)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der von [57] vorgeschlagene Algorithmus verwendet. Dieser Algorithmus bewertet Kanten durch Berechnung eines sogenannten Scores, der verschiedene geometrische Eigenschaften berücksichtigt. Hierzu zählen neben dem Lotabstand insbesondere Winkelinformationen wie z.B. die Winkeldifferenz aus Bewegungsrichtung und Kantenrichtung. Diese Eigenschaften werden individuell gewichtet und zu einem Gesamtscore addiert. Je höher der Score ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Fahrzeug auf der entsprechenden Kante befindet.

Um den Algorithmus im Fall einer aktiven Zielführung, also beim Befahren einer Route, robuster zu machen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein weiterer Score eingeführt. Über diesen Score erhalten Kanten der aktiven Route eine zusätzliche positive Wertung. Die-

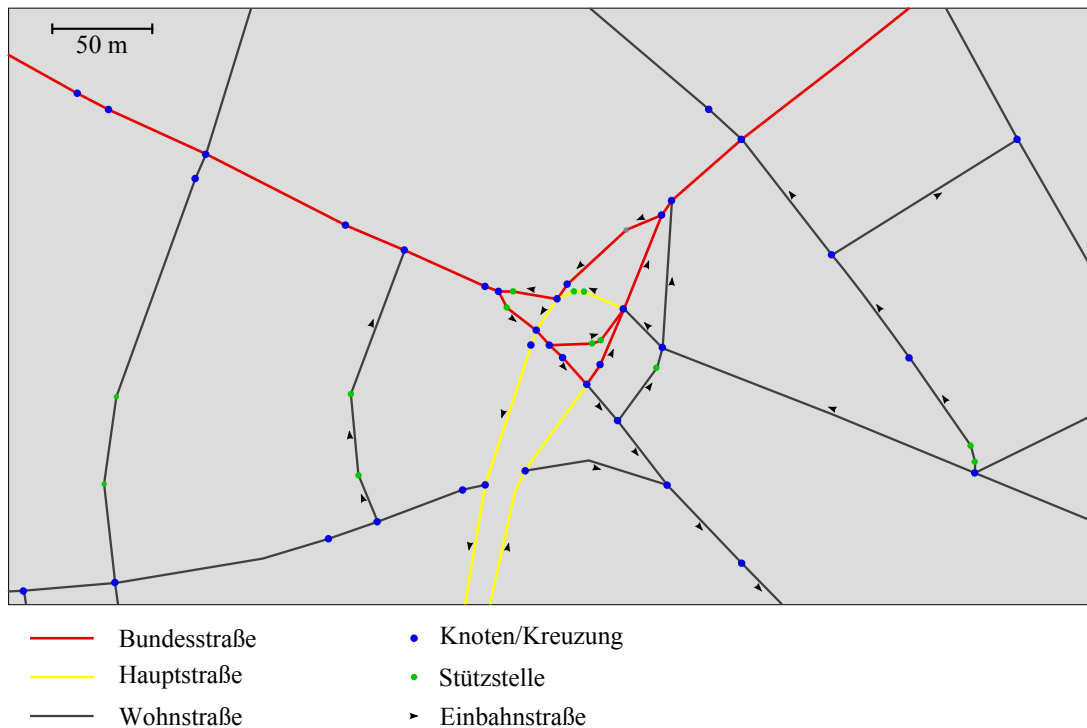


Abbildung 3.1.: Aufbau digitale Straßenkarte am Beispiel Rudolfplatz, Braunschweig

ses auch als Routenboost bezeichnete Feature macht den Map Matcher unempfindlicher gegen kleinere Ortungsungenauigkeiten. Diese Ortungsungenauigkeiten können insbesondere bei einer hohen Straßendichte, wie z.B. innerhalb der in Abbildung 3.1 gezeigten komplexen Kreuzung, zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Unter Verwendung der jeweiligen Routen wurden für die Datensätze beider Strecken Referenzen zum digitalen Straßennetzwerk berechnet und in der Datenbank abgelegt. Nachgelagerten Funktionen ist es damit möglich, die Rohdaten für einzelne Kanten aus der Datenbank auszulesen.

### 3.2.3. Segmentierung der CQI-Daten

Der letzte Schritt bei der Erstellung der CQI-Karte ist die Segmentierung der Daten. Unter Segmentierung ist die Identifikation von Abschnitten der CQI-Karte zu verstehen, denen jeweils ein gemittelter CQI-Wert zugeordnet wird. Die Aufgabe des Segmentierungsalgorithmus besteht darin, unter Verwendung von möglichst wenig Segmenten den durch die Mittelwertbildung entstandenen Fehler zu minimieren. In der Literatur sind zwei Arten von Segmentierungsalgorithmen beschrieben, i) die Einteilung der Strecke in Segmente fester Länge, im folgenden Feste-Länge-Algorithmen genannt, sowie ii) die Entrauschung eines abschnittsweise konstanten Signals.

Feste-Länge-Algorithmen werden unter anderem von [9] zur Erstellung von Bandbreitenkarten von Mobilfunknetzen verwendet. Dabei werden in Abständen von 500 m Segmentgrenzen gesetzt, denen ein aggregierter Bandbreitenwert (gemeint ist der Daten-

durchsatz) zugeordnet wird. In [8] wird ein ähnlicher Ansatz beschrieben, wobei die Segmentlänge durch die Länge der assoziierten Straßennetzwerkkannten vorgegeben wird. Zusätzlich wird eine maximale Segmentlänge definiert, überlange Segmente werden entsprechend aufgeteilt. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Segmentierung in beiden Fällen nur von der Streckengeometrie bestimmt wird, die aufgezeichneten Messwerte werden nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz hierzu verwenden Algorithmen zur Entrauschung eines abschnittsweise konstanten Signals als Kriterium zur Segmentierung den zeitlichen oder, im Falle einer Kartendarstellung, den longitudinalen Verlauf der Messwerte entlang der Messstrecke. In den Arbeiten von [58, 59] werden verschiedene Methoden zur Entrauschung abschnittsweise konstanter Signale vorgestellt. Auf der Homepage des Autors<sup>2</sup> wird zudem der entsprechende Quellcode angeboten. Mittels dieses Quellcodes wurden die einzelnen Algorithmen hinsichtlich der Eignung zur Erstellung der CQI-Karte untersucht. Hierzu wurden die CQI-Rohdaten der Teststrecke 1 im Bereich von 7000-8000 m verwendet. Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse.

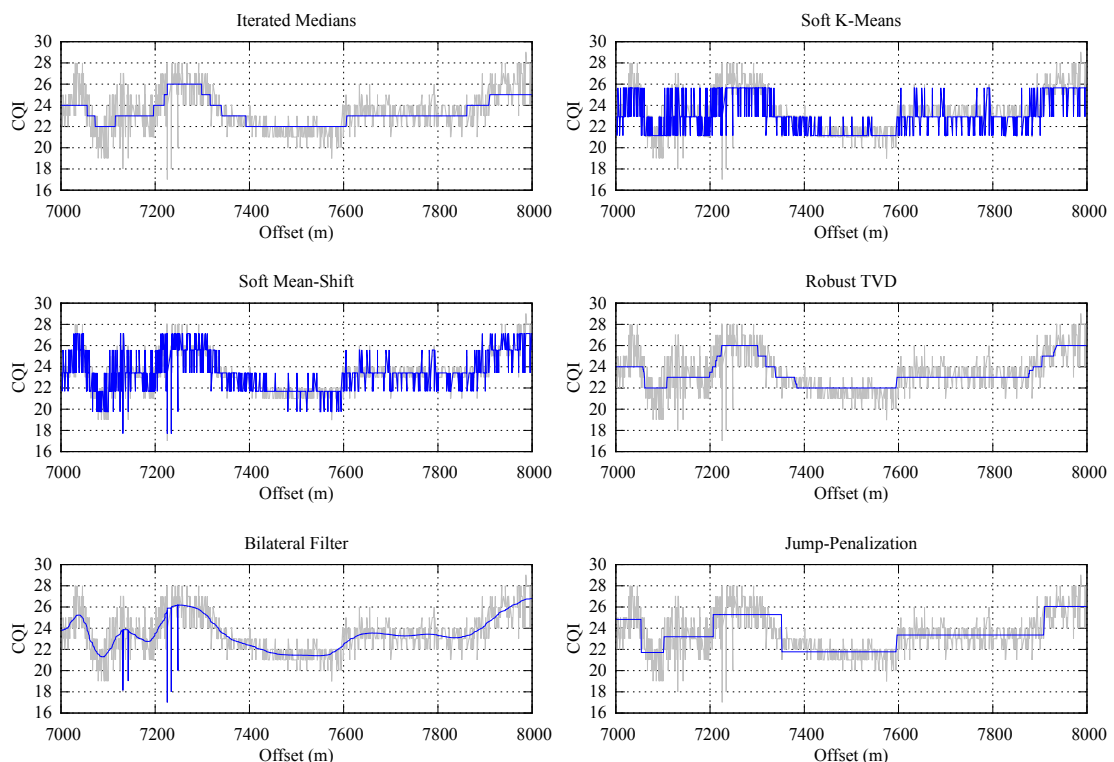


Abbildung 3.2.: Bewertung von Methoden zur Entrauschung abschnittsweise konstanter Signale. Grau: CQI-Rohdaten, blau: Ergebnis Algorithmus.

Die Evaluierung der Methoden zeigt deutliche Unterschiede in den Ergebnissen. Sowohl die Mean-shift- wie auch die K-Means-Clustering-Algorithmen, von denen in Abbildung

<sup>2</sup><http://www.maxlittle.net/software/index.php>, PWCToolbox, Stand Februar 2015

3.2 die Varianten Soft K-Means und Soft Mean-Shift exemplarisch dargestellt sind, führen zu keiner segmentweisen Aufteilung der Rohdaten in konstante Stufen. Stattdessen werden globale Stufen errechnet, den Rohdaten wird die jeweils dichteste Stufe zugeordnet. Damit bleibt das Ergebnis weiterhin verrauscht, wodurch diese Algorithmen für die Erzeugung der CQI-Karte ungeeignet sind.

Der Iterated Medians- als auch die Familie der Total Variation Denoising-Algorithmen generieren zwar konstante Stufen, allerdings werden zwischen den eigentlichen Hauptstufen viele sehr kurze Zwischenstufen hinzugefügt. Der Bilateral Filter-Algorithmus generiert keine konstanten Stufen, sondern glättet das Signal lediglich. Außerdem werden einige „Ausreißer“ ungefiltert übernommen. Alle drei Methoden sind deshalb ebenfalls ungeeignet.

Der Jump-Penalization (Jump-P) Algorithmus hingegen identifiziert für die betrachteten Rohdaten zuverlässig die einzelnen konstanten CQI-Stufen. Zwischenstufen oder Ausreißer sind nicht vorhanden.

---

#### Algorithmus 1 Jump-Penalization Algorithmus

---

```
// jeder Schleifendurchlauf generiert eine neue Segmentgrenze
for (int m = 0; m < NO_OF_SEGMENTBORDERS; m++) {
    double MinRMSE = -1.0;
    int NewBorderIndex = 0;
    // iteriere über alle CQI-Werte und suche Index der
    // nächsten Segmentgrenze
    for (int n = 0; n < CQIValues.size(); n++) {
        // prüfe, ob Minimalabstand zu bestehenden Segmentgrenzen
        // eingehalten wird
        if (distanceToSegmentBorders(n) > MIN_DISTANCE) {
            // setze eine temporäre Segmentgrenze bei n
            setTempSegmentBorder(n);
            // berechne den resultierenden RMSE
            double RMSE = calcRMSE();
            // erster Aufruf oder geringerer RMSE: Index übernehmen
            if ((MinRMSE < 0) || (RMSE < MinRMSE)) {
                MinRMSE = RMSE;
                NewBorderIndex = n;
            }
        }
    }
    // neue Segmentgrenze übernehmen
    addNewSegmentBorder(NewBorderIndex);
}
```

---

Der Jump-P-Algorithmus bestimmt die Segmentgrenzen, also diejenigen CQI-Werte, an denen Segmentgrenzen eingefügt werden, in einem iterativen Verfahren. In jeder Iteration wird derjenige Offset durch eine lineare Suche bestimmt, der im Fall einer dort platzierten Segmentgrenze den resultierenden mittleren quadratischen Fehler minimiert.



Der mittlere quadratische Fehler wird auch als Root Mean Square Error (RMSE) bezeichnet und ist in Gleichung 3.2 definiert.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\overline{CQI}_{Segment} - CQI_{raw})^2} \quad (3.2)$$

mit

- $n$ : Gesamtanzahl an CQI-Werten
- $CQI_{raw}$ : ungefilterter CQI-Wert
- $\overline{CQI}_{Segment}$ : mittlerer CQI-Wert des Segments

Ergänzend zu der in [59] vorgestellten ursprünglichen Form des Jump-P-Algorithmus wurde eine untere Grenze für die Segmentlänge definiert. Diese Erweiterung verhindert die Generierung von sehr kurzen Segmenten, deren Länge die während des Messintervalls von 1 s zurücklegbare Strecke und damit die longitudinale Auflösung unterschreitet. Unter Berücksichtigung der insbesondere im außerstädtischen Bereich erreichten Fahrzeuggeschwindigkeiten wurde die untere Grenze auf 50 m gesetzt. Das an die Programmiersprache Java angelehnte Listing (Algorithmus 1) verdeutlicht den Ablauf beim Finden der optimalen Segmentgrenzen. Bedingt durch zwei kaskadierte Iterationen über die CQI-Rohdaten hat der Jump-P-Algorithmus eine quadratische Komplexität  $O(n^2)$ , die Feste-Länge-Algorithmen hingegen sind als lineare Suche implementiert und haben damit eine Komplexität von  $O(n)$ .

Um die Leistungsfähigkeit des Jump-P-Algorithmus zu verdeutlichen, wurde dieser mit den Feste-Länge-Algorithmen verglichen, wobei Segmentlängen von 500 m, 100 m sowie 50 m verwendet werden. Als Gütekriterium wird der in Gleichung 3.2 definierte RMSE verwendet. Die in Tabelle 3.3 zusammengefassten Ergebnisse zeigen deutlich die Leistungsfähigkeit des Jump-P-Algorithmus. Verglichen mit Feste-Länge 50 m genügen dem Jump-P-Algorithmus bei beiden Strecken weniger als 1/3 Segmente, um eine vergleichbare Qualität zu erreichen. Die Abweichung des RMSE beträgt für Strecke 1 0,2 %, im Fall von Strecke 2 wird ein Wert von 0,6 % erreicht, jeweils bezogen auf den RMSE des Feste-Länge-50 m-Algorithmus.

Algorithmus	Strecke 1		Strecke 2	
	Anzahl Segmente	RMSE	Anzahl Segmente	RMSE
Feste-Länge 500 m	24	2,007	11	2,443
Feste-Länge 100 m	119	1,523	54	2,105
Feste-Länge 50 m	237	1,397	107	2,025
Jump-P	70	1,4	33	2,037

Tabelle 3.3.: Vergleich der Segmentierungsalgorithmen

Die Unterschiede beider Verfahren illustriert der in Abbildung 3.3 dargestellte Ausschnitt der CQI-Karte von Strecke 1. Im Gegensatz zum Jump-P-Algorithmus verwenden

die Feste-Länge-Verfahren zum Setzen der Segmentgrenzen ausschließlich den longitudinalen Versatz der Rohdaten, der Verlauf der Rohdaten selber wird nicht einbezogen. Während der Jump-P-Algorithmus die Segmentgrenzen bezogen auf den RMSE optimal platziert, liegen die Segmente des Feste-Länge-Algorithmus häufig ungünstig. Die schwarzen Rechtecke markieren die entsprechenden Bereiche des Diagramms.

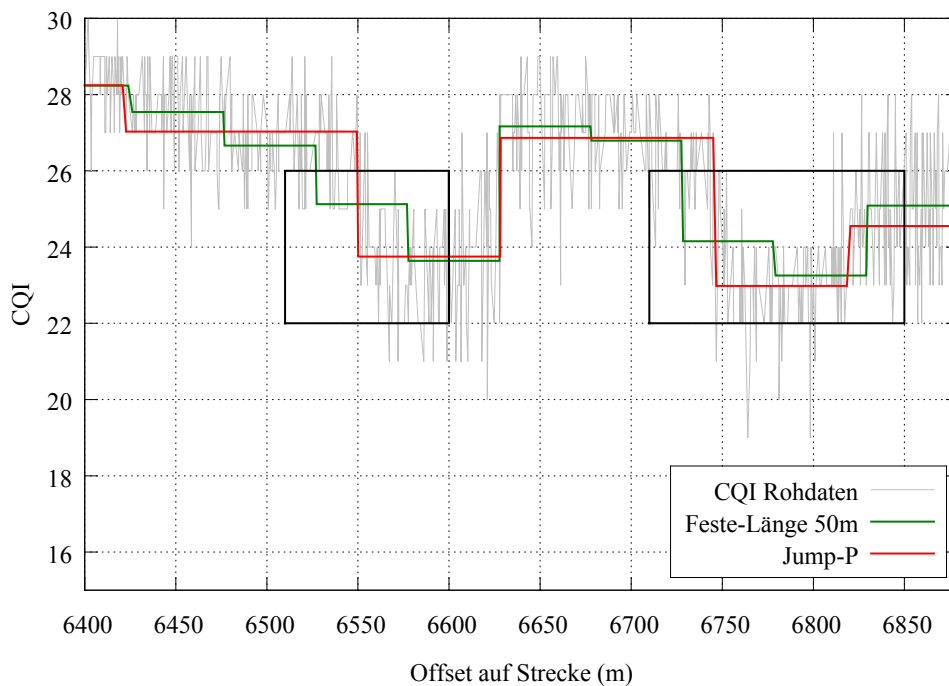


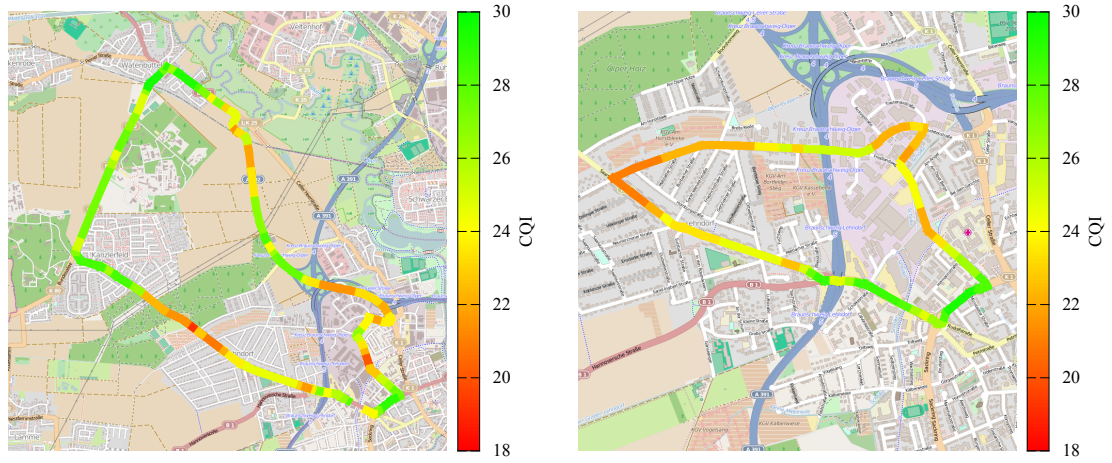
Abbildung 3.3.: Ausschnitt der CQI-Karte von Strecke 1

### 3.2.4. Attributierung der digitalen Straßenkarte

Abschließend werden die CQI-Segmente beider Strecken zur der digitalen Straßenkarte hinzugefügt und damit geografisch referenziert. Es entsteht die finale CQI-Karte, die von nachgelagerten Applikation verwendet werden kann.

Analog zu dem in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Aufbau von NDS-Karten wird ein optionales (flexibles) Attribut definiert und den jeweiligen Kanten zugeordnet. Das Attribut besteht aus den Elementen  $\{Typ, Wert, Offset, Länge, Richtung\}$ , wobei der eigentliche Attributinhalt durch *Typ* und *Wert* beschrieben wird. Die Elemente *Offset* und *Länge* definieren die Lage des Attributs bezogen auf die Eltern-Kantengeometrie, über *Richtung* kann die Fahrtrichtung festgelegt werden, für die das Attribut Gültigkeit hat. Diese generische Definition erlaubt es, den Attributraum zu einem späteren Zeitpunkt zu erweitern, ohne Anpassungen am Kartenformat vornehmen zu müssen.

Abbildung 3.4 zeigt die unter Verwendung des Jump-P-Segmentierungsalgorithmus erzeugten CQI-Karten für beide Teststrecken. Die Darstellung als sogenannte Heatmap zeigt deutlich, welcher Dynamik die in der Karte abgelegten CQI-Werte unterworfen sind.



(a) Strecke 1 (befahren im Uhrzeigersinn)

(b) Strecke 2 (befahren entgegen Uhrzeigersinn)

Abbildung 3.4.: CQI-Karten für beide Strecken unter Verwendung des Jump-P-Algorithmus

### 3.3. CQI und Datendurchsatz

Im Folgenden soll das Konzept, eine CQI-Karte zur Prädiktion der erreichbaren Datendurchsätze zu verwenden, durch Vergleich des CQI-abhängigen Datendurchsatzes auf IP-Ebene mit den theoretisch erreichbaren Werten validiert werden. Hierfür werden zunächst Formeln zur Berechnung des maximal erreichbaren Datendurchsatzes (auf IP-, TCP- sowie Applikationsschicht) angegeben. Diese Gleichungen enthalten über die Transportblockgröße eine direkte Abhängigkeit zum CQI.

#### 3.3.1. Berechnung des maximalen Datendurchsatzes

Bei der Berechnung des maximalen Downlink-Datendurchsatzes auf IP-Ebene müssen die HSDPA-spezifischen Eigenschaften des Protokollstacks sowie des Highspeed-Kanals berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben fungieren die über den HS-DSCH übertragenen MAC-hs-PDUs als Container für MAC-d-PDUs. Ein MAC-d-PDU ist genau einem MAC-hs-PDU zugeordnet, eine Aufteilung auf mehrere MAC-hs-PDUs ist nicht möglich [23]. Die Anzahl  $Num_{D-PDU}$  der in einem MAC-hs-PDU transportierten Mac-d-PDUs ergibt sich demnach durch Division der Nutzdatengröße (engl. Payload)  $Size_{HS-PL}$  eines MAC-hs-PDU durch die Größe eines MAC-d-PDU  $Size_{D-PDU}$  (siehe Gleichung 3.3).

$$Num_{D-PDU} = \left\lfloor \frac{Size_{HS-PL}}{Size_{D-PDU}} \right\rfloor \quad (3.3)$$

Die Nutzdatengröße eines MAC-hs-PDU bzw. Transportblocks ergibt sich durch Subtraktion des 21 Bit langen Headers [23] von der jeweiligen Bruttogröße. Diese Bruttogröße kann gemäß Abschnitt 2.5.2 aus Tabellen des 3GPP entnommen werden. Die Größe eines MAC-d-PDU  $Size_{D-PDU}$  ergibt sich als Summe der MAC-d-Nutzdatengröße  $Size_{D-PL}$  und

der Header der RLC- sowie MAC-d-Schicht. Die Nutzdatengröße beträgt 320 bzw. 640 Bit [60], der RLC-Header hat im Acknowledged Mode (AM), sofern keine Kennzeichnung des Endes eines RLC-SDU durch „Length Indicators“ erfolgt, eine Größe von 16 Bit [22]. Ein MAC-d-Header wird nach Abschnitt 2.3.1 nur benötigt, wenn mehrere logische Kanäle (DTCH) konfiguriert sind und damit ein Multiplexing auf dem zugeordneten Transportkanal stattfindet. Daher wird in den folgenden Ausführungen analog zu den Arbeiten von [61, 62] von einer Nutzdatengröße von 320 Bit und einer RLC/MAC-d-Headergröße von 16 Bit ausgegangen. Ein MAC-d-PDU hat damit eine Größe von 336 Bit.

$$TP_{max,IP} \approx (1 - BLER) \cdot \frac{Num_{D-PDU} \cdot Size_{D-PL}}{MinInterTTIInterval \cdot TTI} \quad (3.4)$$

Der maximale Datendurchsatz auf IP-Ebene  $TP_{max,IP}$  ergibt sich gemäß Gleichung 3.4 durch Berücksichtigung der Fehlerrate  $BLER$  sowie des von den UE-Eigenschaften abhängigen Übertragungsintervalls. Das Übertragungsintervall berücksichtigt neben dem systemimmanenten  $TTI$  von 2 ms die individuellen Fähigkeiten des UE, in direkt aufeinander folgenden TTI Daten zu empfangen. Der Parameter Minimum inter-TTI interval ( $MinInterTTIInterval$ ) definiert hierzu die Anzahl an TTI, in denen ein TTI mit Daten empfangen werden kann. Ist dieser Wert gleich 1, so können in jedem aufeinander folgenden TTI Daten empfangen werden, bei einem Wert von 2 nur in jedem zweiten usw.. Die endgerätekatgorieabhängigen  $MinInterTTIInterval$ -Werte, die sich im Wertebereich von 1 bis 3 bewegen, sind in den Tabellen des 3GPP zu finden [33].

Gleichung 3.4 geht von folgenden Randbedingungen aus:

1. Transparente PDCP-Schicht

Die Kompression von IP-Headern ist deaktiviert, wodurch keine PDCP-Header benötigt werden (siehe Abschnitt 2.3.1).

2. Ausreichende Anzahl von HARQ-Prozessen

Nach Abschnitt 2.5.3 werden für einen kontinuierlichen Datenfluss bei einem  $MinInterTTIInterval$  von 1 mindestens sechs HARQ-Prozesse benötigt. Ist  $MinInterTTIInterval$  größer 1, so kann die Zahl der HARQ-Prozesse reduziert werden. Bei einem  $MinInterTTIInterval$  von 2 sind drei HARQ-Prozesse ausreichend, bei einem  $MinInterTTIInterval$  von 3 werden nur noch zwei HARQ-Prozesse benötigt. Für einen kontinuierlichen Datenfluss aus Sicht der Endgerätekatgorie muss daher die in Gleichung 3.5 formulierte Bedingung gelten.

$$MinInterTTIInterval \cdot Num_{HARQ} \geq 6 \quad (3.5)$$

Der Datendurchsatz auf TCP-Ebene  $TP_{TCP}$  ergibt sich aus dem IP-Datendurchsatz  $TP_{IP}$  durch die Berücksichtigung der Länge des IP-Headers  $Size_{IPHeader}$  bezogen auf die Gesamtgröße des IP-Pakets  $Size_{IP}$ :

$$TP_{TCP} = TP_{IP} \cdot \frac{Size_{IP} - Size_{IPHeader}}{Size_{IP}} \quad (3.6)$$

Bei IPv4 beträgt  $Size_{IP}$  üblicherweise 1500 Bytes, der IP-Header hat eine Größe von 20 Bytes.

Analog kann der Datendurchsatz auf Applikationsebene  $TP_{App}$  berechnet werden, wobei  $Size_{TCP}$  die Größe eines TCP-Segments und  $Size_{TCPHeader}$  die Länge des TCP-Headers angibt.

$$TP_{App} = TP_{TCP} \cdot \frac{Size_{TCP} - Size_{TCPHeader}}{Size_{TCP}} \quad (3.7)$$

Durch die Beziehung  $Size_{TCP} = Size_{IP} - Size_{IPHeader}$  kann Gleichung 3.7 in folgende Form überführt werden:

$$TP_{App} = TP_{IP} \cdot \frac{Size_{IP} - Size_{IPHeader} - Size_{TCPHeader}}{Size_{IP}} \quad (3.8)$$

Sofern keine TCP-Optionen aktiviert sind, beträgt die Länge des TCP-Headers 20 Bytes. Mit diesen Standardwerten stehen auf TCP-Ebene 98,7% und auf Applikationsebene 97,3% des Datendurchsatzes der IP-Ebene zur Verfügung.

### 3.3.2. Auslastung der Luftschnittstelle

Eine wesentliche Voraussetzung für die folgenden Ausführungen ist, dass die Luftschnittstelle, also der HS-DSCH sowie die darunter liegenden HS-PDSCH, während der Messungen am Kapazitätslimit betrieben wird. In diesem Fall sind die erreichten Datendurchsätze nach Abschnitt 2.7 primär von der Ressourcenzuteilung durch den Scheduler abhängig, der Datenfluss ist weitgehend entkoppelt von den TCP-Steuerungsmechanismen. Zur Erkennung dieses Zustands kann die TCP RTT verwendet werden. Hohe RTT indizieren einen hohen Pufferfüllstand (Bufferbloat-Effekt) und damit einen ausgelasteten Mobilfunkkanal.

Abbildung 3.5 zeigt exemplarisch den jeweils in den Messintervallen von 1 s gefundenen kleinsten TCP RTT für die 24. Runde von Strecke 2. Die RTT-Messungen basieren auf der im RFC1323 spezifizierten TCP Timestamps Option [55]. Es ist deutlich zu erkennen, dass abgesehen von wenigen Ausnahmen ein im Verhältnis zum Start der Datenübertragung erhöhter RTT vorliegt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die assoziierten Datenpuffer ausreichend gefüllt sind, um den Datenstrom von den TCP-Steuerungsmechanismen zu entkoppeln. Dies bestätigt die Beobachtungen von [24, 44], dass insbesondere HSDPA-Netze in Kombination mit der im Rahmen der Messungen verwendeten TCP-Variante CUBIC vom Bufferbloat-Effekt betroffen sind. Die gemessenen Datendurchsätze sind damit primär von den vom Scheduler zugeteilten Ressourcen der Luftschnittstelle und natürlich vom jeweiligen CQI-Wert abhängig.

### 3.3.3. Maximal erreichbarer Datendurchsatz

Zur Bewertung des Zusammenhangs zwischen CQI und IP-Datendurchsatz wurden zunächst die kumulativen Wahrscheinlichkeiten (englisch Cumulative Distribution Function, CDF) der gemessenen Datendurchsätze auf IP-Ebene betrachtet. Die Diagramme in Abbildung 3.6 zeigen für beide Teststrecken deutliche Abstufungen der einzelnen Kurven

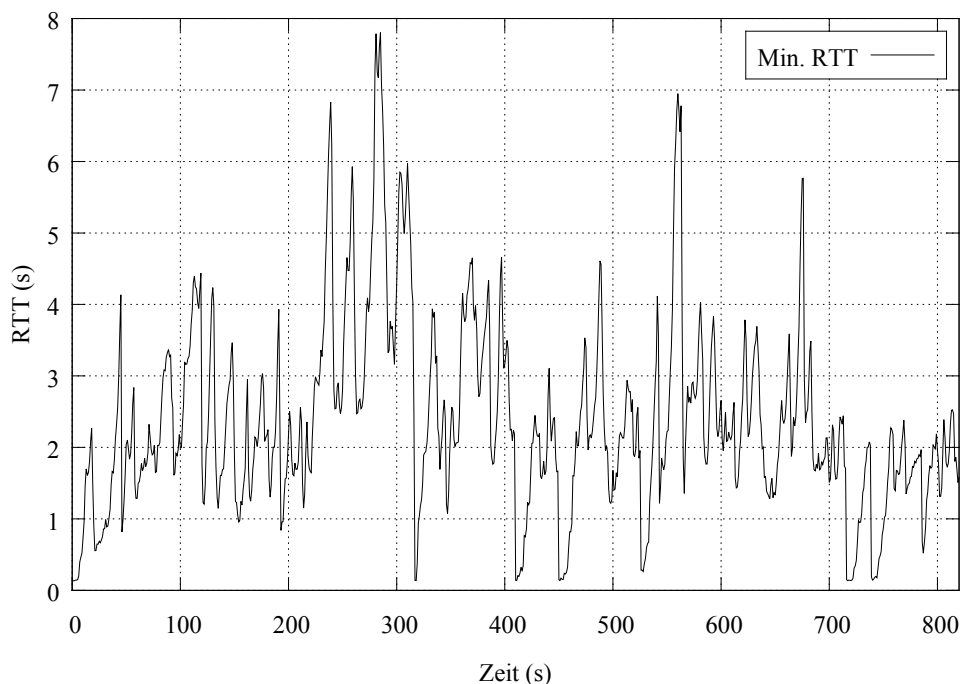


Abbildung 3.5.: Minimale TCP RTT von Runde 24 von Strecke 2

für CQI-Werte kleiner 25. Diese Abstufen spiegeln die diskreten Transportblockgrößen wider, die gemäß Abschnitt 3.3.1 zu diskreten Stufen des maximal erreichbaren Datendurchsatzes auf IP-Ebene führen. Die Kurven der CQI-Werte im Bereich [25-30], die in den Diagrammen gestrichelt dargestellt sind, liegen hingegen dicht beieinander. Dies indiziert, dass die Transportblockgröße und damit der IP-Datendurchsatz gleich ist. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Strecke 2 zeigt diese Beobachtung besonders deutlich.

Während der Messungen wurde von Modem durchgängig eine HSDPA-Kategorie von 24 ausgegeben. Nach den Definitionen des 3GPP [32] ist in diesem Fall CQI-Tabelle D oder, falls 64QAM konfiguriert ist, Tabelle G anzuwenden. Tabelle 3.4 vergleicht die resultierenden theoretischen sowie die gemessenen IP-Datendurchsätze, wobei letztere als Durchschnittswert der jeweiligen höchsten 1 %, 2 % und 5 % der Messwerte (Top-Werte) repräsentiert sind. Im CQI-Bereich [20-25] passt der Verlauf der gemessenen Datendurchsätze verglichen mit den Tabellen D und G gut, die Lücke zu den theoretisch erreichbaren Werten spiegelt die Eigenschaft wider, dass der HSDPA-Mobilfunkkanal gemeinsam genutzt wird und somit anderen Teilnehmern ebenfalls Ressourcen zugeordnet werden. Für höhere Werte allerdings stagnieren die Messwerte, während die theoretischen Werte weiter steigen. Dieses Verhalten lässt sich mit der vertragsbedingten Limitierung des Datendurchsatzes auf 7,2 Mbit/s brutto erklären, was 5,77 Mbit/s auf IP-Ebene entspricht. Tabelle 3.4 zeigt daher zusätzlich Tabelle B, die diesem Grenzwert entspricht.

Trotz der vertragsbedingten Limitierung auf 7,2 Mbit/s kann die Luftschnittstelle konform zur HSDPA Kategorie 24, also unter Verwendung der Tabellen D oder G, betrieben

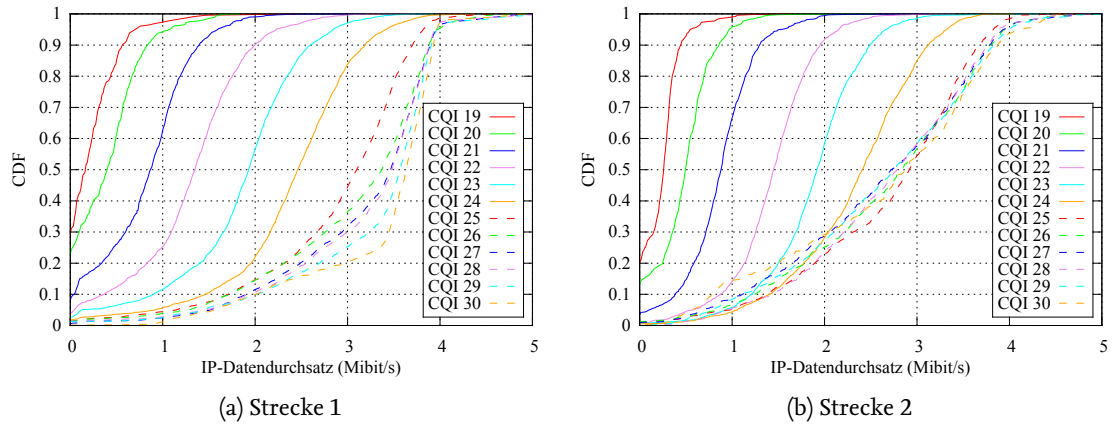


Abbildung 3.6.: CDF der IP-Datendurchsätze für verschiedene CQI-Werte

werden. Entsprechende Mechanismen im RNC oder im Scheduler des NodeB können eine Drosselung herbeiführen, indem beispielsweise weniger Ressourcen der Luftschnittstelle zugewiesen werden. Im folgenden Abschnitt wird daher die Kapazität der verwendeten Zellen bestimmt, so dass weitere Rückschlüsse zur Konfiguration der Luftschnittstelle gezogen werden können.

### 3.3.4. Bestimmung der Zellkapazität

Prinzipiell ist es möglich, dass einzelne Nutzer trotz vorhandener technischer Voraussetzungen nicht die volle Kapazität der Zelle ausschöpfen können. Beispielsweise kann vertragsbedingt die maximale Datenrate begrenzt werden, oder es können einzelne Datenflüsse gegenüber anderen bevorzugt oder benachteiligt werden (sogenanntes Traffic Shaping).

Zur Interpretation der erreichten Datendurchsätze muss daher der individuell erreichbare Datendurchsatz sowie die Zellkapazität bekannt sein. Zur Bestimmung beider Parameter wurden Messungen des erreichbaren Datendurchsatzes mit bis zu vier identischen gleichzeitig aktiven Modems (siehe Abschnitt 3.2.1) innerhalb einer Zelle durchgeführt. Jedes Modem verwendet eine zu einem separaten Mobilfunkvertrag gehörende SIM-Karte, die Mobilfunkverträge sind bzgl. der Leistungsmerkmale identisch.

Als Ergebnis der Messungen konnte festgestellt werden, dass für die im Rahmen der Messfahrten verwendeten Zellen sowohl die Zellkapazität als auch die individuellen vertragsbedingten maximalen Datendurchsätze 7,2 Mbit/s betragen. Abbildung 3.7 zeigt einen Auszug der gemessenen individuellen sowie aufsummierten Datendurchsätze aller vier Modems auf IP-Ebene. Der Grenzwert von 7,2 Mbit/s brutto entspricht nach Abschnitt 3.3.1 5,77 Mbit/s auf IP-Ebene und ist als horizontale Linie eingezeichnet. Die Lücke zwischen Summenkurve und Grenzwert reflektiert, dass der HSDPA-Mobilfunkkanal eine gemeinsam genutzt wird und somit auch andere Mobilfunkteilnehmer Ressourcen zugewiesen bekommen.

Die Ergebnisse dieses sowie des vorherigen Abschnitts sind eine deutliche Indikation

CQI	Maximaler IP-Datendurchsatz (Mbit/s)								
	Theoretisch			Strecke 1			Strecke 2		
	Tabelle			Top			Top		
	B	D	G	1%	2%	5%	1%	2%	5%
20	2,33	2,33	2,33	1,66	1,58	1,37	1,64	1,45	1,22
21	2,61	2,61	2,61	2,27	2,08	1,87	2,20	2,05	1,82
22	2,88	2,88	2,88	3,02	2,85	2,59	2,79	2,63	2,40
23	3,85	3,85	3,85	3,49	3,36	3,12	3,42	3,20	2,95
24	4,53	4,53	4,53	3,97	3,85	3,66	3,69	3,60	3,48
25	5,77	5,77	5,77	4,33	4,17	3,99	4,23	4,12	3,98
26	5,77	7,00	6,32	4,57	4,44	4,22	4,65	4,48	4,21
27	5,77	8,79	8,79	4,85	4,67	4,30	4,70	4,54	4,24
28	5,77	9,48	10,71	4,88	4,64	4,25	4,61	4,46	4,19
29	5,77	9,89	13,05	4,99	4,77	4,34	4,75	4,57	4,29
30	5,77	10,44	15,66	4,85	4,57	4,23	4,50	4,45	4,34

Tabelle 3.4.: Vergleich von theoretischen und gemessenen maximalen IP-Datendurchsätzen

dafür, dass die Zellen konform zu der im initialen Release 5 spezifizierten Kategorie 7 bzw. 8 betrieben werden. In diesem Fall werden bis zu 10 parallele HS-PDSCH-Kanäle unter Verwendung von 16-QAM (Quadraturamplitudenmodulation) unterstützt. 3GPP sieht in diesem Fall die Verwendung der CQI-Tabelle B vor, die in Anhang A abgebildet ist.

### 3.4. CQI-Verteilung und Zellwechsel

Die Häufigkeitsverteilung der CQI-Werte gibt einen Überblick darüber, wie gut die Abdeckung des Mobilfunknetzes in dem untersuchten Testgebiet ist. Je dichter das Netz ist, desto höher ist der mittlere CQI und damit auch der Anteil hoher CQI-Werte. Das Histogramm in Abbildung 3.8 zeigt die Häufigkeitsverteilung der CQI-Werte für beide Teststrecken. Für beide Strecken liegt der Hauptanteil im CQI-Bereich [20, 30], für Strecke 1 94,4% und für Strecke 2 90,8% aller Messwerte. CQI-Werte unter 15 wurden bei beiden Strecken nicht gemessen.

Bedingt durch die Bewegung des Messfahrzeugs verändern sich fortwährend die Signalstärken und damit die Kanalqualitäten der in Reichweite befindlichen Zellen. Sobald aufgrund der Signalstärkemessungen eine Entscheidung zum Zellwechsel getroffen wurde, wird dieser wie in Abschnitt 2.6 beschrieben durchgeführt. Aus Sicht des UE erscheint der Zellwechsel normalerweise als kurze Unterbrechung der Datenübertragung.

Abbildung 3.9 zeigt anhand eines Ausschnitts der achten Runde von Strecke 1 die Datendurchsatz- und CQI-Verläufe in der Umgebung von Zellwechseln. Vor Zellwechseln, die als blaue vertikale Linien eingezeichnet sind, degradieren CQI wie auch Datendurchsatz üblicherweise signifikant, es kann, wie im Fall der Zellwechsel 3, 4 und 5 zu sehen ist, zu einem Verlust der Datenverbindung auf IP-Ebene kommen. Dieser Zusammenhang



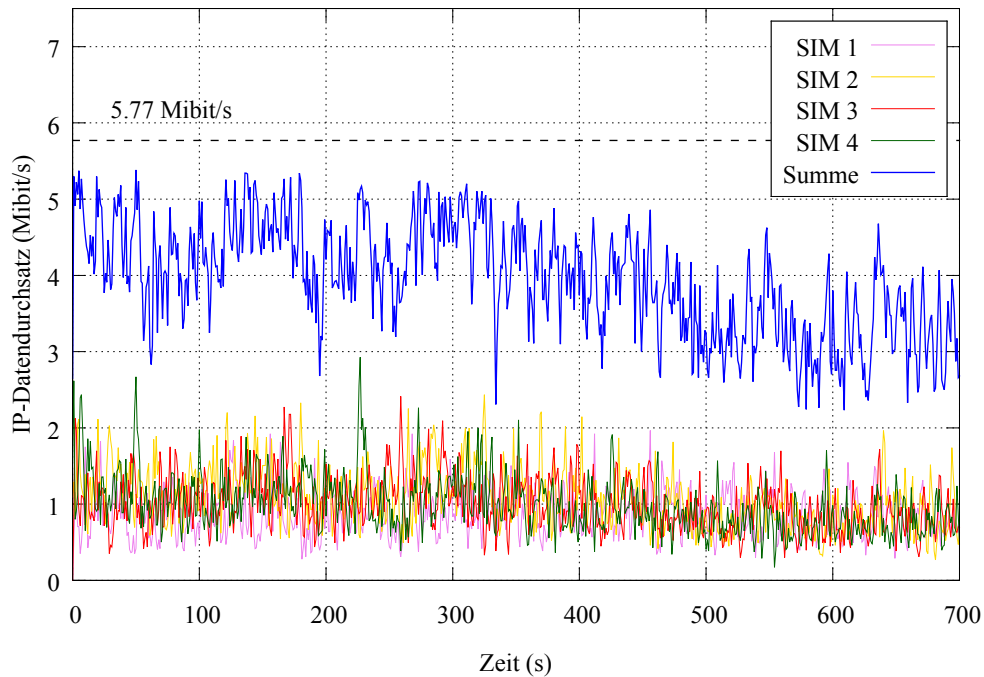


Abbildung 3.7.: Parallele Messung des IP-Datendurchsatzes mit vier SIM-Karten

spiegelt sich auch in den kumulativen Wahrscheinlichkeiten (Abbildung 3.6) durch einen positiven y-Achsenabschnitt für die CQI-Werte 19-21 wider. Bei Zellwechsel 5 kommt es zudem zu einem Abbruch der HSDPA-Verbindung, angedeutet durch einen negativen CQI-Wert. Aus Nutzersicht erscheinen diese Zellwechsel damit wie ein konventionelles Funkloch. Es sei jedoch erwähnt, dass dieser Ausschnitt ein Negativbeispiel ist. Die Mehrheit der Zellwechsel verläuft ohne Abbruch der HSDPA- bzw. IP-Verbindung.

Eine weitere Beobachtung ist, dass einige Zellwechsel nur kurzfristig zu einer Verbesserung der Kanalqualität führen, so dass nach kurzer Zeit ein weiterer Zellwechsel nötig ist. In Abbildung 3.9 ist dieses Verhalten bei den Zellwechseln 1 und 3 festzustellen. In der Arbeit von [10] wird dieses Phänomen als „Ping-Pong-Effekt“ beschrieben, der sich bedingt durch die Unterbrechungen der Datenübertragung negativ auf die Performanz auswirkt.

### 3.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Verfahren beschrieben und validiert, um speziell für HSDPA eine sogenannte CQI-Karte zu erzeugen. Diese Karte erlaubt die ortsbezogene Abfrage des CQI, einem Wert, der einen direkten Rückschluss auf den maximal erreichbaren Datendurchsatz zulässt.

Im Rahmen von Messfahrten wurden entlang zweier Teststrecken die CQI-Werte gemessen und dem Straßennetzwerk durch Verwendung eines Map Matchings zugeordnet.

Für das Segmentieren der Daten, also dem Identifizieren von Streckenabschnitten, de-

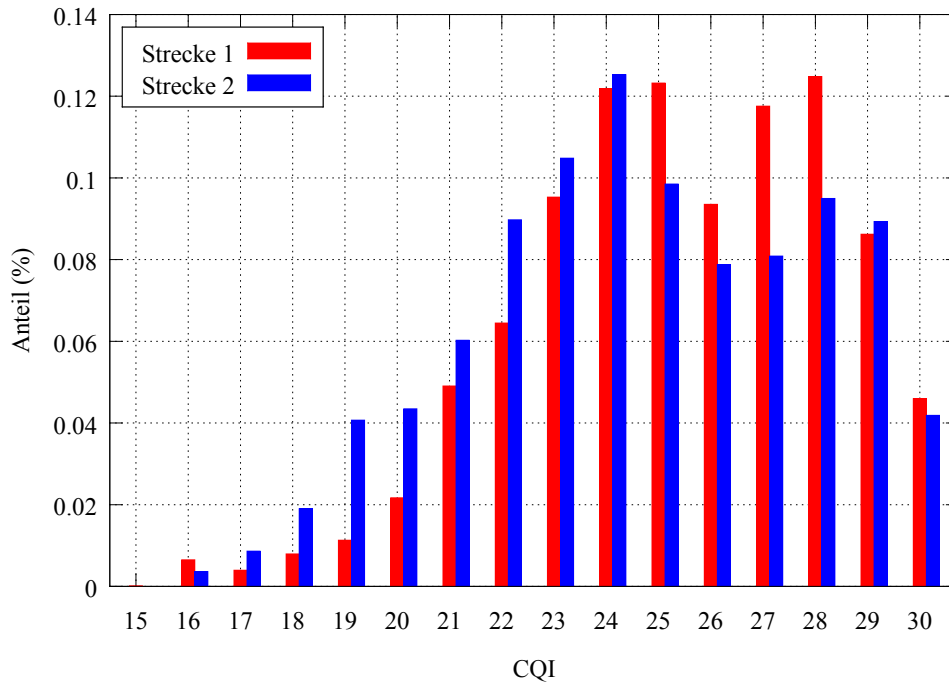


Abbildung 3.8.: Histogramm der CQI-Werte

nen ein identischer mittlerer CQI-Wert zugeordnet wird, wurde mit dem Jump-P-Algorithmus [59] ein für diesen Anwendungszweck neues Verfahren vorgestellt. Verglichen mit der Unterteilung der Daten in Segmente mit einer festen Länge von 50 m erreicht der Jump-P-Algorithmus bei nur einem Drittel an Segmenten eine nahezu identische Güte.

Zur Validierung des Konzeptes, eine CQI-Karte zur Prädiktion der erreichbaren Datendurchsätze zu verwenden, wurden die CQI-abhängigen gemessenen mit den maximal erreichbaren Datendurchsätzen verglichen. Hierfür wurden Formeln hergeleitet, aus denen in Abhängigkeit des CQI sowie der HSDPA-Netzwerkconfiguration die maximalen Durchsätze auf IP-, TCP- und Applikationsebene berechnet werden können. Dieser Vergleich wie auch die diskreten kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen zeigen deutlich die Validität des vorgeschlagenen Konzeptes.

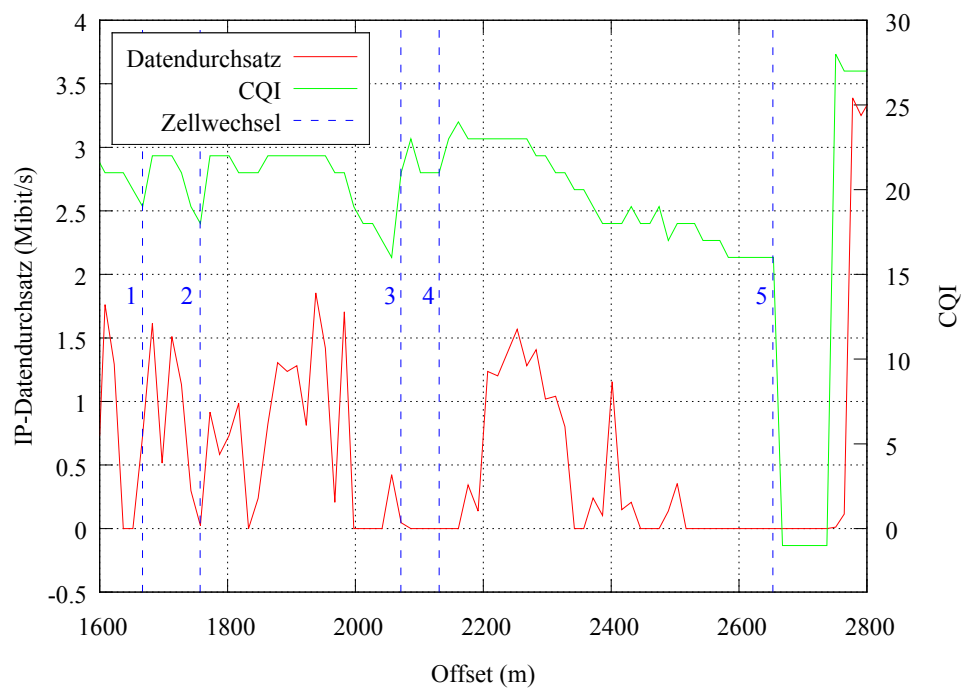


Abbildung 3.9.: IP-Datendurchsatz und CQI-Werte im Bereich von Zellwechseln, Runde 8 von Strecke 1



## 4 Simulationsumgebung

Während der Entwicklung neuer mobiler Anwendungen sind Simulationsumgebungen mächtige Werkzeuge. Jedes gewünschte Szenario kann arrangiert und beliebig oft reproduzierbar simuliert werden, teure Prüfstände werden selten oder gar nicht benötigt. Besonderes Augenmerk muss auf die Simulation der Mobilfunkverbindung gelegt werden, da deren Performanz einen großen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit mobiler Anwendungen hat. Um die Validität der Simulationsergebnisse sicherzustellen, muss der Mobilfunkkanal so realistisch wie möglich modelliert werden, insbesondere muss der Datenverkehr zeitgleich aktiver Nutzer beachtet werden.

In diesem Kapitel wird die im Rahmen dieser Dissertation aufgebaute Simulationsumgebung beschrieben, und es wird ein neues Verfahren zur Modellierung von Netzlast [63] vorgestellt. Dieses neue Verfahren, welches speziell für HSDPA entwickelt wurde, erzeugt die Netzlast direkt im NodeB, indem dort zusätzliche UE platziert werden, die an der Verteilung der Ressourcen der Luftschnittstelle teilnehmen. Die Anzahl dieser sogenannten synthetischen UE, also das eigentliche Modell, wird aus den in Kapitel 3 beschriebenen Messungen abgeleitet.

### 4.1. Aufbau der Software

Die Simulationsumgebung besteht aus zwei Komponenten, die in Abbildung 4.1 als hell- bzw. dunkelgrau eingefärbte Blöcke dargestellt sind. Im unteren Teil befindet sich die Simulation des HSDPA-Netzes und im oberen Teil die Logik des Servers sowie der Clients, also der Fahrzeuge. In diesem Teil befinden sich die im folgenden Kapitel beschriebenen Komponenten der optimierten Datenübertragung.

#### 4.1.1. Simulation HSDPA-Netz und TCP-Datenübertragung

Die Simulation des HSDPA-Netzes basiert auf dem Netzwerksimulator *ns-2* [64] in der Version 2.35 inklusive des in [31] vorgestellten HSDPA-Moduls *Eurane*. Zusätzlich wird die in [65] vorgestellte Erweiterung verwendet, die das ursprünglich auf eine Zelle beschränkte *Eurane* in eine Mehrzellenumgebung überführt und zudem die in Abschnitt 2.3.2 diskutierte Iub-Flusskontrolle zwischen RNC und NodeB implementiert. Diese Erweiterung erlaubt die Simulation mehrerer NodeB, die mit einem RNC verbunden sind. Mobile Endgeräte (UE) können während der Simulation einen Zellwechsel durchführen, der angelehnt an den in Abschnitt 2.6 diskutierten Inter-NodeB-Zellwechsel umgesetzt ist. Aus Sicht des UE erscheinen Zellwechsel als kurze Unterbrechung der Datenübertragung. Zur Iub-Flusskontrolle, die den Datenaustausch zwischen der MAC-d- und der MAC-hs-Schicht unter Verwendung des Frame-Protokolls steuert, kommt der von [66] vorgestellte Algorithmus zum Einsatz, der nach dem Autor auch Necker's Algorithmus

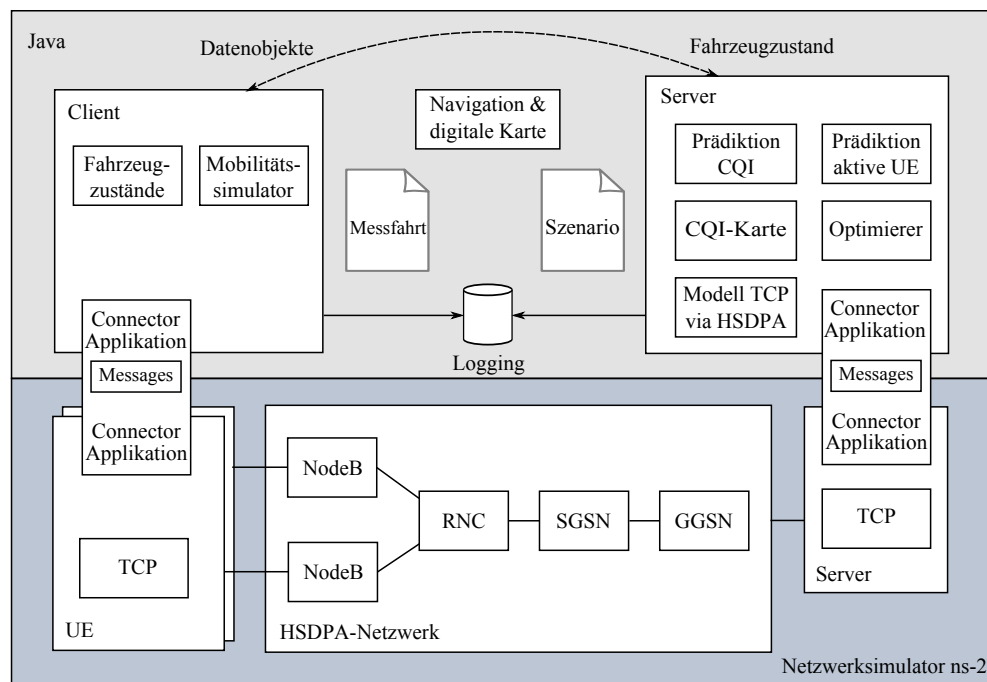


Abbildung 4.1.: Die Simulationssoftware

genannt wird.

#### 4.1.1.1. RRC-Zustände

Ein mit dem HSDPA-Netz verbundenes UE kann sich grundsätzlich in verschiedenen RRC-Zuständen befinden, die nach Abschnitt 2.4 vom RNC gesteuert werden. Seitens des 3GPP wurde ein umfassendes Zustandsdiagramm veröffentlicht, in dem alle validen Transitionen zwischen den definierten Zuständen abgebildet sind. Die konkrete Konfiguration der Radio Ressource Control (RRC) bleibt dem jeweiligen Mobilfunkanbieter überlassen.

Für das im Rahmen der Messungen verwendete HSDPA-Netz wurde die RRC-Konfiguration empirisch ermittelt. Abbildung 4.2 zeigt das resultierende Zustandsdiagramm, fokussiert auf den Zustand „RRC Connected“. Nicht verwendete Zustände und Transitionen sind grau dargestellt. Das verwendete Verfahren ist in Anhang B erklärt.

In der inaktiven Phase befindet sich das Modem im Zustand CELL\_PCH. Sobald Daten per HSDPA übertragen werden sollen, wird in den CELL\_FACH-Zustand gewechselt, was im Mittel 532 ms dauert. Die Transition in den Zustand CELL\_DCH wird eingeleitet, sobald die RLC-Pufferbelegung 362 Bytes erreicht bzw. überschreitet. Im Mittel werden hierfür 1113 ms benötigt. CELL\_FACH wie auch CELL\_DCH werden erst verlassen, wenn für eine gewisse Zeitspanne  $t_{Inactivity}$  keine Daten in den Puffern vorhanden sind.  $t_{Inactivity}$  beträgt in beiden Fällen 2000 ms. Die Transition von CELL\_DCH zu CELL\_FACH wurde im untersuchten Netzwerk nicht beobachtet, sondern es wird bei Inaktivität direkt von CELL\_DCH in CELL\_PCH gewechselt. Eine Rückstufung in RRC Idle wurde nicht festgestellt, weswegen dieser Zustand in Abbildung 4.2 nicht aufgeführt ist.

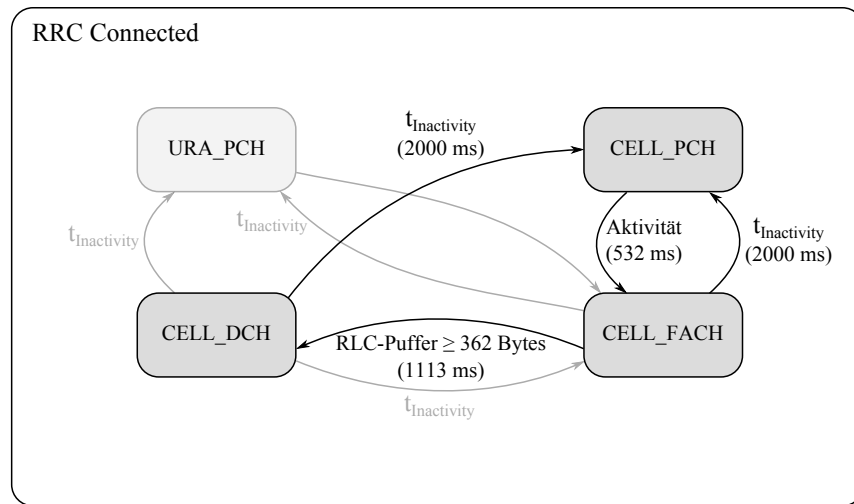


Abbildung 4.2.: RRC-Konfiguration des verwendeten HSDPA-Netzes

Die oben beschriebene Bedingung für die Rückstufung aus dem CELL\_DCH-Zustand (keine Aktivität für  $t_{Inactivity}$ ) bedeutet auf der anderen Seite, dass selbst kleinste zyklisch übertragene Datenmengen den Zustand CELL\_DCH aufrecht erhalten. Diese Aussage wurde durch Messungen verifiziert, im konkreten Fall mit Datenpaketgrößen von 36 Bytes. Für den Anwendungsfall der optimierten Datenübertragung bedeutet dies, dass selbst TCP Quittungen (Acknowledges) mit einer Mindestgröße von 40 Bytes den CELL\_DCH-Zustand aufrechterhalten, sofern  $t_{Inactivity}$  nicht überschritten wird. Durch die zyklischen Übertragung des Fahrzeugzustands an den Server mit einer Frequenz von 1 Hz wird diese Bedingung eingehalten. Daher wird im Folgenden davon ausgegangen, dass sich die Modems der Fahrzeuge im DCH-Zustand befinden und dauerhaft in diesem Zustand bleiben.

#### 4.1.1.2. Umsetzung der TCP-Datenübertragung

Zum Datenaustausch zwischen Server und Client wird analog zu den in Kapitel 3 vorgestellten Messungen TCP verwendet. *ns-2* stellt für die TCP-Kommunikation diverse sogenannte Agenten zur Verfügung, die sowohl unidirektionale wie auch bidirektionale Verbindungen unter Verwendung unterschiedlicher Staukontrollalgorithmen (Congestion Control) implementieren. Für die Simulation wird der Agent *FullTcp* verwendet, der im Gegensatz zu anderen Implementierungen das Auf- und Abbauen von Duplexverbindungen erlaubt und sich damit für die Erzeugung realitätsnahen Netzwerkverkehrs eignet [67]. Analog zur Konfigurationen aktueller Linux-Kernel wurde RFC 2861 [68] berücksichtigt. Dieser RFC sieht vor, dass eine TCP-Verbindung nach einer Ruhezeit zurückgesetzt wird und damit erneut die Slow-Start-Phase beginnt. Die Ruhezeit ist definiert als das aktuelle Retransmission Timeout (RTO).

Tabelle 4.1 fasst die verwendete Konfiguration des Netzwerksimulators *ns-2* zusammen. Die Parameter „Anzahl HS-PDSCH“ sowie „Modulation/Kodierung“ wurde aus den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Messungen des verwendeten Mobilfunknetzes abgeleitet, die

<b>HSDPA</b>	
Anzahl HS-PDSCH	10
Modulation/Kodierung	CQI-Tabelle B, 7,2 Mbit/s brutto
Größe MAC-hs Header	21 Bit
Größe RLC-PDU	336 Bit
Anzahl HARQ-Prozesse	6
RRC-Zustände	DCH (ausschließlich)
Zellwechsel	Inter-NodeB-Zellwechsel
Scheduler	PF-Scheduler ( $T_c = 1000$ )
<b>Verbindungen</b>	
Server $\leftrightarrow$ GGSN	100 Mbit/s, 8 ms
GGSN $\leftrightarrow$ SGSN	155 Mbit/s, 6 ms
SGSN $\leftrightarrow$ RNC	155 Mbit/s, 6 ms
RNC $\leftrightarrow$ NodeB	155 Mbit/s, 15 ms
Iub Flusskontrolle	Necker's Algorithmus [66]
<b>TCP</b>	
TCP-Stack	FullTcp
RFC	RFC 2861

Tabelle 4.1.: Konfiguration der Simulationsumgebung

restlichen Parameter der Kategorie *HSDPA* sowie die Parameter der Kategorie *Verbindungen* wurden der Arbeit von [65] entnommen.

#### 4.1.2. Umsetzung Client und Server

Während die Netzwerksimulation in der Programmiersprache C++ realisiert ist, wurde für die im oberen Teil von Abbildung 4.1 befindlichen Komponenten zur Datenverteilung sowie deren Optimierung Java ausgewählt. Diese Wahl ist in der Tatsache begründet, dass für den Zugriff auf die digitale Straßenkarte bereits eine in Java implementierte Bibliothek bereitstand. Für die Kopplung javabasierter Software mit *ns-2* wurde von [69] mit dem Werkzeug *AgentJ* eine Lösung vorgeschlagen, bei der in Java initiierte Netzwerkoperationen wie z.B. die Kommunikation per TCP durch *ns-2* ausgeführt werden, ohne dass Änderungen am Java Quellcode durchgeführt werden müssen. *AgentJ* wurde evaluiert, benötigte allerdings ein Java Entwicklungspaket (JDK), welches inkompatibel zu der verwendeten Kartenzugriffsschicht ist. Zudem ist es nicht möglich, die Ausführung der Netzwerksimulation anzuhalten, um Fehlersuche und -bereinigung (Debugging) durchzuführen. Der Einsatz von *AgentJ* war daher nicht möglich.

Beide Softwareteile sind daher als separate Prozesse umgesetzt, die über eine Nachrichtenschnittstelle miteinander kommunizieren. In Abbildung 4.1 ist diese Kommunikation



als Teil des Moduls „Connector Applikation“ angedeutet, welches Teil beider Prozesse ist. Für Details zur Umsetzung wird auf Anhang C verwiesen.

#### 4.1.2.1. Simulation von Mobilität

Neben den im Rahmen der Erstellung der CQI-Karte aufgezeichneten Daten wurden weitere Fahrten durchgeführt, die exklusiv zur Simulation der Fahrzeuge sowie der in den Fahrzeugen verbauten Mobilfunkmodems in Rahmen der Evaluation verwendet wurden. Diese Fahrten wurden für beide Teststrecken an jeweils einem Tag direkt nacheinander durchgeführt, im Falle von Strecke 1 handelt es sich um acht, bei Strecke 2 um 12 Datensätze bzw. Runden. Die Daten der einzelnen Runden sind damit zeitlich entkoppelt, die Startzeitpunkte liegen zwischen 10 und 15 Minuten auseinander. Ferner stehen die Daten auch örtlich nicht in Bezug zueinander. Beispielsweise war die Verkehrsdichte nicht immer identisch, oder es gab individuelle Stopps an Ampeln oder Fußgängerüberwegen. Um die in Kapitel 6 vorgestellten Szenarien zu simulieren, ist es allerdings nötig, die unabhängig voneinander aufgenommenen Fahrten zu kombinieren, also zeitlich wie örtlich zueinander in Beziehung zu setzen.

Daher wurde mit Hilfe des Mobilitätssimulators SUMO [70] für die einzelnen Szenarien die Bewegung der beteiligten Kraftfahrzeuge simuliert, so dass diese auf dem jeweiligen Streckabschnitten hintereinander herfahren. Analog zu den durchgeführten Messungen liefert SUMO die Bewegungspfade als Liste geografischer Positionen, Geschwindigkeiten und Fahrtrichtungen mit einer Frequenz von 1 Hz. Die vorher zeitlich wie örtlich entkoppelten Daten stehen nun in Zusammenhang zueinander.

SUMO ist ein sogenannter mikroskopischer Simulator, der die Bewegung auf Fahrzeugebene unter Verwendung eines Fahrzeug-Folge-Modells berechnet. Als Grundlage der Berechnung werden eine digitale Straßenkarte sowie Fahrzeugkonfigurationen verwendet. In der Straßenkarte sind Parameter wie die maximal zulässige Geschwindigkeit oder die Anzahl an Fahrspuren einer Straße definiert, die Fahrzeugkonfiguration legt die Eigenschaften des Fahrzeugs fest, beispielsweise die maximale Längsbeschleunigung und -verzögerung. Für die Simulation wurde die in Abschnitt 3.2.2 diskutierte NDS-Karte in Verbindung mit der Standard-Konfiguration für PKW verwendet. Das ebenfalls standardmäßig von SUMO verwendete Fahrzeug-Folgemodell ist in [71] beschrieben.

Die simulierten, zueinander zeitlich wie örtlich in Beziehung stehenden Bewegungspfade müssen abschließend mit den aufgezeichneten Daten kombiniert werden. Während die Fahrzeugzustände (Position, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung) von SUMO geliefert werden, müssen die Parameter des Mobilfunknetzwerks den aufgezeichneten Daten entnommen werden. Bei den Parametern des Mobilfunknetzes handelt es sich um den CQI-Wert sowie den PSC der verbundenen Zelle. Nach Abschnitt 2.6 ist der PSC geeignet, um eine Zelle in einem begrenzten geografischen Gebiet eindeutig zu identifizieren.

Die Kombination der Daten erfolgt durch Iteration über die SUMO-Fahrzeugzustände und Suche der Rohdatenpunkte der Messfahrt mit der jeweils geringsten Entfernung, die durch Interpolation zu einem neuen Datum zusammengefasst werden. Das Ergeb-

nis ist eine vollständige Liste aller benötigter Fahrzeug- und Modemdaten, die auf Seite des Clients für die Wiedergabe innerhalb der Simulationsumgebung benötigt werden. In Abbildung 4.1 ist diese Funktionalität durch die Komponenten „Fahrzeugzustände“ und „Mobilitätssimulator“ angedeutet. Die Komponenten des Blocks „Server“ sind der Vollständigkeit halber bereits aufgeführt, für die Erklärungen wird auf das folgende Kapitel verwiesen.

## 4.2. Generierung von Netzlast

Eine wesentliche Komponente bei der Simulation drahtloser Verbindungen ist die Erzeugung realistischer Netzlast, also dem Datenverkehr, der durch gleichzeitig aktive Nutzer verursacht wird. Viele existierende Netzlastgeneratoren erzeugen Netzlast, indem zusätzliche Knoten in das zu simulierende Netzwerk eingefügt werden, die als Client bzw. Server agieren. Zwischen diesen Knoten werden Datenpakete ausgetauscht, wodurch die gewünschte Netzlast erzeugt wird. Allerdings benötigt die Simulation dieser Datenpakete zusätzliche Rechenlast, die Simulationsgeschwindigkeit sinkt.

Das Netzlastmodell, also die zeitliche Beschreibung der Last, kann auf verschiedene Arten implementiert werden. Netzlastgeneratoren, die auf Applikationsebene arbeiten, beschreiben und erzeugen den typischen Datenverkehr einer Applikation oder Applikationskategorie. Hierfür muss das Verhalten der entsprechenden Applikation einschließlich der verwendeten Netzwerkprotokolle unter typischen Nutzungsbedingungen nachgebildet werden. Da die Interna vieler Applikationen unbekannt sind, folgt ein hoher Aufwand für die Nachkonstruktion („Reverse Engineering“). Das Abdecken der netzlaststärksten Anwendungen ist damit quasi unmöglich [67], zumal diese Rangleiste einer hohen Dynamik unterworfen sein dürfte.

Viele Netzlastgeneratoren verwenden daher aufgezeichnete Daten, die sogenannten Traces, aus denen das Netzlastmodell hergeleitet wird. Dieser Ansatz ist auch für die Lasterzeugung bei Mobilfunknetzwerken möglich, allerdings werden hierzu Traces von Verbindungen innerhalb des Mobilfunknetzwerks benötigt, die leider nicht vorliegen. Entsprechende Unterstützungsanfragen an den Anbieter des untersuchten Mobilfunknetzwerks verliefen negativ.

Im Folgenden wird ein neuer Ansatz zur Modellierung und Generierung vorgestellt, der speziell auf HSDPA zugeschnitten ist. Zusätzliche UE, auch synthetische UE genannt, nehmen an der Ressourcenverteilung im NodeB teil und erzeugen so die zusätzliche Last. Die Anzahl synthetischer UE, also das Modell, wird aus den in Kapitel 3 vorgestellten Datendurchsatzmessungen abgeleitet, wodurch die Simulationsergebnisse der Realität sehr nahe kommen. Dieser Ansatz macht sich den in Abschnitt 2.7 beschriebenen Bufferbloat-Effekt zunutze, bei dessen Eintreten auf einen ausgelasteten Mobilfunkkanal geschlossen werden kann. Sobald der Mobilfunkkanal gesättigt ist, wird der Datendurchsatz allein durch die Verteilung der Ressourcen durch den Scheduler bestimmt. Wenn der maximal mögliche Datendurchsatz nicht erreicht wurde, wurden demnach anderen UE Ressourcen zugeordnet.

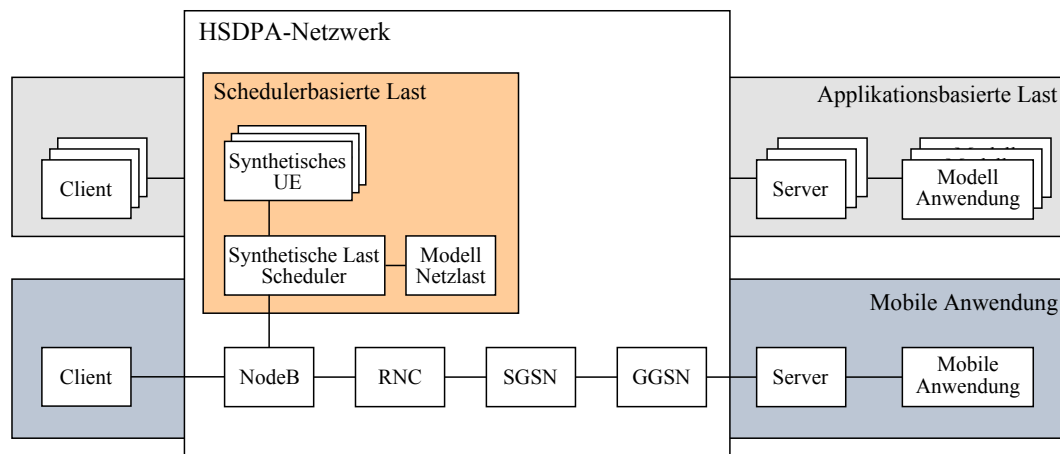


Abbildung 4.3.: Applikationsbasierte und schedulerbasierte Lasterzeugung

Da die schedulerbasierte Lasterzeugung auf Basis der Ressourcenverteilung der Luft-schnittstelle arbeitet, ist sie unabhängig von den Applikationen und Protokollen, durch die die Last ursprünglich generiert wurde. Des weiteren werden keine zusätzliche Netzwerkknoten benötigt, zwischen denen Datenpakete ausgetauscht werden. Dies reduziert die benötigte Rechenlast, so dass Simulationsszenarien entsprechend schneller prozessiert werden können.

Abbildung 4.3 vergleicht die beiden Verfahren am Beispiel eines einfachen HSDPA-Netzes mit einer Zelle. Im unteren dunkelgrauen Kasten befindet sich die zu entwickelnde mobile Anwendung, bestehend aus einem Client-Server-Paar. Der obere helle Kasten zeigt die zur applikationsbasierten Lasterzeugung benötigten Komponenten, bestehend aus Client- und Serverknoten sowie den Lastmodellen der zu simulierenden Anwendungen. Die schedulerbasierte Lasterzeugung hingegen befindet sich innerhalb des HSDPA-Netzwerkes und besteht aus dem modifizierten Scheduler, den lasterzeugenden synthetischen UE sowie dem Netzlastmodell.

#### 4.2.1. Verwandte Arbeiten

Das Netzlastmodell, also die zeitliche Beschreibung der Last, kann auf verschiedene Arten implementiert werden. Netzlastgeneratoren, die auf Applikationsebene arbeiten, beschreiben und erzeugen den typischen Datenverkehr einer Applikation oder Applikationskategorie. Das *PackMime* Modul [72] beispielsweise erzeugt HTTP-Datenverkehr, indem Client- und Serverknoten Anfragen und Antworten in Form von Sessions austauschen, also analog zum Verhalten von Nutzern bei der Nutzung eines Web-Browsers. Das stochastische Modell wurde aus Netzwerkmitschnitten zweier Hauptverbindungsleitungen (Access Links), also aus empirischen Daten, abgeleitet. Zusätzlich unterstützt das in *ns-2* implementierte Modul Datenflüsse mit konstanter Bitrate, also UDP-Datenverkehr. *PackMime* wurde evaluiert, allerdings bietet das Modell mit der Erzeugungsrate neuer Sessions lediglich einen Parameter, der nutzerseitig verändert werden kann. Hiermit war es nicht möglich, die im Rahmen der Messungen gewonnenen Verteilungen der Daten-

durchsätze zu erzielen.

Mit den Modulen *webtraf* [73] und *nsweb* [74] stehen zwei weitere in *ns-2* umgesetzte Module zur Verfügung, die sich allerdings wie *PackMime* auf die Simulation von HTTP-Datenverkehr fokussieren. Allen drei applikationsbasierten Modulen ist gemein, dass mit HTTP nur ein Teil des heutigen Datenverkehrs abgebildet wird. Um realistischen Datenverkehr zu erzeugen, müssten weitere Applikationen (z.B. Datenaustausch über FTP) nachgebildet und gleichzeitig betrieben werden. Wie bereits erwähnt ist das Erstellen und Pflegen der Applikationsmodelle sehr aufwändig, so dass von diesem Vorgehen abgeraten werden muss.

Das ebenfalls in *ns-2* implementierte *TMix* [67] ist nicht auf HTTP beschränkt, sondern erlaubt die Generierung beliebigen TCP-basierten Datenverkehrs. Analog zu *PackMime* wird der Datenverkehr in Form von Sessions beschrieben, wobei eine Session eine Abfolge von auszutauschenden Datenobjekten und Wartezeiten zwischen den einzelnen Datenübertragungen ist. Die Arbeit von [75] ergänzt *TMix* um die Möglichkeit, Sessions durch zufälliges Zusammenstellen zu kombinieren, um so neue Variationen zu erzeugen. Neben dem zur Simulationslaufzeit verwendeten Lastgenerator besteht *TMix* aus einem Werkzeug, mit dem die Session-Beschreibungen aus Traces generiert werden können. Dieser Ansatz ist auf TCP beschränkt, verbindungslose Protokolle (UDP) werden nicht unterstützt. Eine Evaluation von *TMix* war in Ermangelung von Netzwerkmitschnitten nicht möglich.

Außerhalb von *ns-2* werden in der Arbeit von [76] realistische Netzlastmodelle speziell für HSDPA-Netzwerke vorgestellt. Die Modelle wurden aus Traces generiert, die in einen im Betrieb befindlichen Netzwerk an den Iub-Schnittstellen zwischen RNC und NodeB aufgezeichnet wurden. Die Aufzeichnung dauerte drei Tage und bezog 400 Zellen ein. Es wurden vier unterschiedliche Modelle abgeleitet, die unterschiedliche Modi bzw. Betriebspunkte beschreiben, ein umfassendes Lastmodell wird jedoch nicht angegeben.

Der von [77] vorgestellte Netzlastgenerator vereint die Erzeugung von Last auf Applikationsebene mit der Möglichkeit, aufgezeichnete Traces direkt wiederzugeben. Bei der Lasterzeugung auf Applikationsebene kommen wie bei *TMix* stochastische Modelle zum Einsatz, die die Parameter des Datenaustausches (wie Datenpaketgrößen oder Wartezeiten zwischen Datenübertragungen) beschreiben. Da die benötigten Traces nicht zur Verfügung standen und es sich zudem um ein Werkzeug für reale Testumgebungen handelt, konnte keine Evaluation in der verwendeten Simulationsumgebung *ns-2* stattfinden. In der Einleitung der Arbeit ist aktuelle Übersicht von Werkzeugen und Softwaremodulen zu finden, auf die für weitere Details zur Erzeugung von Netzlast verwiesen wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass kein Netzlastmodell bzw. Softwarewerkzeug gefunden wurde, mit dem es möglich ist, die während der Messungen vorgefundene Last nachzubilden.

#### 4.2.2. Netzlastmodell

Um das Modell der schedulerbasierten Lasterzeugung aus den in Kapitel 3 vorgestellten Datendurchsatzmessungen ableiten zu können, müssen folgende Randbedingungen er-

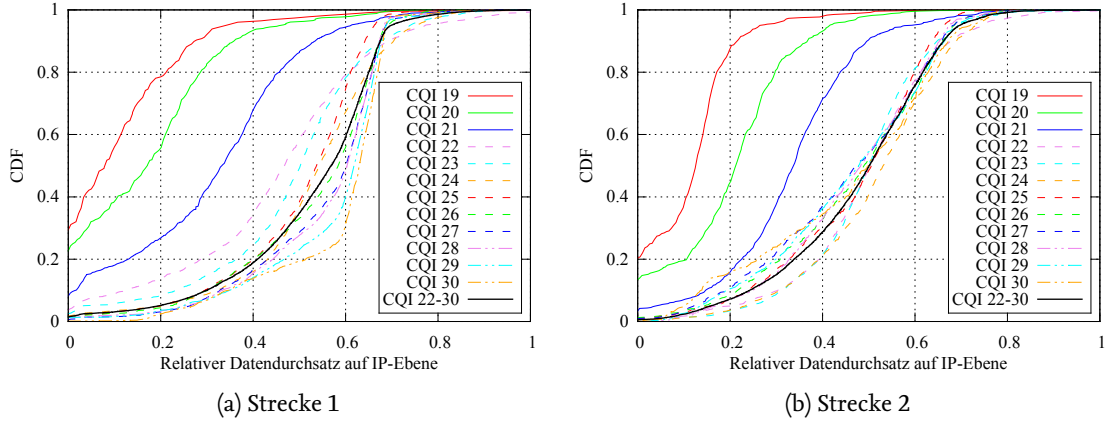


Abbildung 4.4.: CDF der relativen IP-Datendurchsätze für verschiedene CQI-Werte

füllt sein:

1. Der Mobilfunkkanal muss während der Messungen an der Kapazitätsgrenze betrieben worden sein
2. Der Scheduler muss die Ressourcen des Mobilfunkkanals fair, also gleichmäßig, an die aktiven Teilnehmer verteilen

Bedingung 1 stellt sicher, dass die gemessenen Datendurchsätze lediglich durch die Ressourcenverteilung des Schedulers begrenzt werden. Nur unter dieser Voraussetzung, deren Vorhandensein bereits in Abschnitt 3.3.2 erfolgreich nachgewiesen wurde, kann die Anzahl gleichzeitig aktiver zusätzlicher UE berechnet werden. Falls im Zustand der Kanalsättigung der maximal mögliche Datendurchsatz nicht erreicht wurde, wurden anderen UE Ressourcen zugewiesen.

Über Bedingung 2 wird ermöglicht, anhand der gemessenen Datendurchsätze einen Rückschluss auf die Anzahl zusätzlich aktiver UE zu ziehen. Da es nach Abschnitt 2.5.4 unterschiedliche Möglichkeiten bzw. Kriterien zur Verteilung der Ressourcenverteilung gibt, muss die Identifikation des Scheduler-Typs anhand der Beobachtungen bzw. Messungen erfolgen.

#### 4.2.2.1. Identifikation des Scheduler-Typs

Zur Identifikation des Scheduler-Typs werden die kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der relativen Datendurchsätze auf IP-Ebene für die CQI im Bereich 19-30 betrachtet, die in Abbildung 4.4 dargestellt sind. Der relative Datendurchsatz  $TP_{rel,IP}$  ist nach Gleichung 4.1 der Quotient aus dem gemessenen absoluten Datendurchsatz  $TP_{IP}$  und dem CQI-abhängigen maximalen Datendurchsatz  $TP_{max,IP}$  nach Gleichung 3.4:

$$TP_{rel,IP} = \frac{TP_{IP}}{TP_{max,IP}} \quad (4.1)$$

Für beide Strecken ist zu erkennen, dass sich die Kurven in zwei Bereiche einteilen lassen: Für CQI-Werte 22-30 liegen die Kurven sehr dicht beieinander, was ein deutlicher Hinweis auf eine faire Verteilung der Ressourcen ist. Dies wird für Strecke 2 besonders deutlich. Die Kurven für die CQI-Werte 19-21 hingegen sind nach links verschoben, was eine Degradierung während des Scheduling indiziert. Für diese CQI wurden im Verhältnis weniger Ressourcen zugewiesen. Da nach dem Histogramm in Abbildung 3.8 mit 87,3 % (Strecke 1) bzw. 80,4 % (Strecke 2) der Großteil der Messwerte einen  $CQI \geq 22$  aufweist, lag der Fokus zunächst auf dem Finden eines Scheduler-Typs für diese Referenzdaten.

Nach den Ausführungen in Abschnitt 2.5.4 kommen für die Referenzdaten nur Schedulingverfahren in Betracht, die die Ressourcen gleichmäßig zwischen den aktiven UE aufteilen. Zu diesen gehören der Round-Robin sowie der Proportional-Fair (PF) Scheduler. Bei beiden Verfahren erhalten alle aktiven UE unabhängig von individuellen Kanalqualitäten in einem Zeitintervall dieselbe Anzahl an Transportblöcken zugewiesen. Aus Sicht eines UE überlagern sich die CDF-Kurven unterschiedlicher CQI. Den Durchsatz maximierende Konzepte wie *Max Rate* oder *Max C/I* scheiden aus, da diese zu einer deutlich sichtbaren Spreizung der Kurven führen würden. Die Wahl des Scheduler-Typs fiel auf den PF-Scheduler, der in [37] als das überlegene Konzept identifiziert wurde.

Die Degradierung für die CQI-Werte im Bereich 19-21 kann auf verschiedene Arten durch Erweiterung des PF-Schedulers realisiert werden. Entsprechende hybride Konzepte wurden in Abschnitt 2.5.4 diskutiert. Die Umsetzung dieser Konzepte setzt allerdings weiteres Kontextwissen voraus, beispielsweise verwendet der PF-H-Scheduler [40] die Kanalqualitäten aller aktiver UE als weiteres Kriterium. Da dieses Wissen fehlt, wurde eine vereinfachte Umsetzung basierend auf festen CQI-abhängigen Korrekturfaktoren  $F(CQI)$  gewählt, mit denen Gleichung 2.3 erweitert wird:

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq n} \left( F(CQI(k)) \cdot \frac{r_i(k)}{r_{ei}(k)} \right) \quad (4.2)$$

Je kleiner diese Faktoren gewählt werden, desto stärker wird der UE bei der Ressourcenverteilung benachteiligt. Ein Faktor von 1 führt zum ursprünglichen fairen Verhalten des PF-Schedulers.

Die Faktoren  $F(CQI)$  wurden für die CQI 19-21 als Mittelwert aller Verschiebungen zur Referenzkurve zwischen der 10ten und 90ten Perzentil (in 10 % Schritten) berechnet und ergeben sich für Strecke 2  $\{0,255, 0,382, 0,694\}$ . Für Strecke 1 wurden die Faktoren in zwei Iterationen empirisch optimiert und betragen  $\{0,22, 0,329, 0,68\}$ .

#### 4.2.2.2. Berechnung der Anzahl synthetischer UE

Grundsätzlich kann die in einer Zeitspanne  $t_1$  bis  $t_2$  übertragene Datenmenge  $D$  als Integral der Datenrate  $r$  formuliert werden. Für diskrete Systeme kann diese Gleichung in eine Summe mit Zeitschritt  $\Delta t$  überführt werden:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} r(t) dt = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \Delta t \quad (4.3)$$

Im Falle von HSDPA folgt durch Berücksichtigung der Transportblock-basierten Datenübertragung auf dem HS-DSCH sowie der Blockfehlerrate  $BLER$ ,

$$D(T, u) = (1 - BLER) \sum_{j \in S} TB_{Net,j} \quad (4.4)$$

wobei  $S$  die UE  $u$  innerhalb des Zeitintervalls  $T$  zugeordnete Menge an Transportblöcken ist, von denen der Nutzdatenanteil  $TB_{Net,j}$  betrachtet wird.

Wenn nun der Datendurchsatz, der sich als Quotient von  $D$  und  $T$  ergibt, geringer als der maximal mögliche Datendurchsatz ist, so müssen Ressourcen anderen Nutzern zugeordnet worden sein. Im Falle einer fairen, also gleichmäßigen, Ressourcenzuordnung kann die Anzahl gleichzeitig aktiver UE berechnet werden. Wenn z.B. die Hälfte des maximal möglichen Datendurchsatzes innerhalb eines Zeitintervalls  $T$  erreicht wurde, so war im Mittel ein weiterer UE aktiv. Dieser UE hat die andere Hälfte der Ressourcen erhalten. Wurde ein Drittel erreicht, waren zwei weitere UE aktiv und so weiter. Somit kann die Anzahl gleichzeitig aktiver UE  $N$  durch die im Folgenden vorgestellten Formeln errechnet werden.

Zunächst wird in Gleichung 4.5 die untere Stützstelle  $N_{Base}$  berechnet, also die Anzahl zusätzlicher UE, die während des Zeitintervalls  $T$  dauerhaft aktiv war.  $N_{Base}$  ergibt sich nach obiger Erklärung als abgerundeter Kehrwert des relativen Datendurchsatzes auf IP-Ebene  $TP_{rel,IP}$ .

$$N_{Base} = \left\lfloor \frac{1}{TP_{rel,IP}} \right\rfloor \quad (4.5)$$

Der gemessene (nicht abgerundete) relative Datendurchsatz ergibt sich nach Gleichung 4.6 durch lineare Interpolation zwischen den Kehrwerten aus  $N_{Base}$  und  $N_{Base} + 1$ , wobei  $x$  den zeitlichen Anteil angibt, bei dem  $N_{Base} + 1$  zusätzliche UE aktiv sind.  $x$  liegt im Wertebereich  $[0,1]$  und kann durch Umformung von Gleichung 4.6 berechnet werden (siehe Gleichung 4.7).

$$TP_{rel,IP} = \frac{1}{N_{Base} + 1} \cdot x + \frac{1}{N_{Base}} \cdot (1 - x) \quad (4.6)$$

$$x = \frac{TP_{rel,IP} - \frac{1}{N_{Base}}}{\frac{1}{N_{Base} + 1} - \frac{1}{N_{Base}}} \quad (4.7)$$

$$N_{Complete} = N_{Base} + x \quad (4.8)$$

$$N_{Additional} = N_{Base} + x - 1 \quad (4.9)$$

Insgesamt sind im Zeitintervall  $T$  nach Gleichung 4.8  $N_{Base} + x$  UE aktiv, was aber den eigenen, während der Messungen aktiven UE mit einschließt. Um die Anzahl zusätzlicher UE  $N_{Additional}$  zu erhalten, muss  $N_{Complete}$  dekrementiert werden.

$N_{Additional}$  ist eine positive reelle Zahl ( $\mathbb{R}_0^+$ ), deren ganzzahliger Teil die UE definiert, die während des gesamten Zeitintervalls  $T$  aktiv sind. Der Nachkommaanteil gibt den Anteil von  $T$  an, für den ein weiterer UE aktiv ist. Anhand obiger Gleichungen kann nun für jeden Punkt der in Abbildung 4.4 angegebenen Referenzkurven ( $CQI \geq 22$ ) die zugehörige Anzahl gleichzeitig aktiver UE berechnet werden.

Für die Realisierung des Netzlastmodells innerhalb der Simulationsumgebung muss eine mathematische Beschreibung für die durch die Referenzkurven definierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen formuliert werden. Da keine passende Verteilungsfunktion gefunden wurde, wurden die Referenzkurven durch abschnittsweise lineare Funktionen angenähert. Jede Kurve wurde dazu in 10 Segmente unterteilt, die zugehörigen zusätzlichen Stützstellen liegen bei relativen Datendurchsätzen von  $\{0,1, 0,2, 0,25, 0,35, 0,45, 0,53, 0,61, 0,69, 0,76\}$ . Diese Segmentierung kann als Kompromiss zwischen möglichst genauer Annäherung der Quellkurve bei gleichzeitiger Beschränkung der Segmentanzahl verstanden werden.

Neben der Modellierung der Referenzkurven muss die zeitliche Abfolge der vom Netzlastmodell applizierten zusätzlichen UE nachgebildet werden. Zeitliche Abfolge meint, von welchen Quellsegment nach Ablauf des Zeitintervalls  $T$  auf welches Zielsegment übergegangen wird. Die Auswertung der gemessenen Daten hat gezeigt, dass für jedes Quellsegment individuelle Wahrscheinlichkeiten für den Übergang in die jeweiligen Zielsegmente existieren. Daher wurde eine Übergangsmatrix aus allen aufeinanderfolgenden Datensätzen berechnet, deren  $CQI \geq 22$  ist. Diese Übergangsmatrix berücksichtigt bei Strecke 1 84,7 % und bei Strecke 2 77,6 % aller Transitionen und bildet die Basis einer homogenen Markov-Kette erster Ordnung.

#### 4.2.2.3. Datendurchsatzberechnung bei Degradierung

Die in Kapitel 4.2.2.2 angegebene Gleichung 4.6 zur Berechnung des relativen Datendurchsatzes auf IP-Ebene gilt nur für den Sonderfall, dass keine Degradierung während der Ressourcenverteilung stattfindet, also alle Korrekturfaktoren  $F(CQI)$  gleich 1 sind.

Sobald für ein UE ein Korrekturfaktor kleiner 1 angewendet wird, erscheint dieser aus Sicht des PF-Schedulers nicht mehr als vollwertiger Teilnehmer, sondern wird entsprechend degradiert. Wenn beispielsweise der Korrekturfaktor 0,5 beträgt und ein weiterer Teilnehmer mit einem Korrekturfaktor von 1 aktiv ist, so werden nur noch  $1/3$  der Ressourcen zugewiesen, wenn zwei weitere Teilnehmer mit einem Korrekturfaktor von 1 aktiv sind,  $1/5$  der Ressourcen usw.. Im vorliegenden Beispiel haben die zusätzlichen UE durch den doppelt so hohen Korrekturfaktor ein doppelt so hohes Gewicht und „zählen“ damit bei der Ressourcenzuordnung doppelt.

Um dies zu berücksichtigen, müssen anstelle der in Gleichung 4.6 verwendeten Anzahlen  $N$  die jeweiligen Summen der Korrekturfaktoren  $F(CQI)$  verwendet werden. Der relative IP-Datendurchsatz des UE  $j$  ergibt sich demnach zu



$$TP_{rel,IP,j} = \frac{F(CQI_j)}{\sum_{i=1}^n F(CQI_i) + F(CQI_{n+1})} \cdot x + \frac{F(CQI_j)}{\sum_{i=1}^n F(CQI_i)} \cdot (1 - x) \quad (4.10)$$

wobei analog zu Gleichung 4.6 für den Anteil  $x$  des Zeitintervalls  $T$  zusätzlich zu  $UE_1$  bis  $UE_n$  ein weiterer UE ( $UE_{n+1}$ ) aktiv ist.

Diese allgemeine Formel wird im Folgenden verwendet, um in Abhängigkeit des aktuellen CQI-Wertes sowie der Anzahl gleichzeitig aktiver UE den relativen und den daraus resultierenden absoluten Datendurchsatz  $TP_{IP}$  zu berechnen, der sich durch Multiplikation mit dem maximalen Datendurchsatz  $TP_{max,IP}$  (siehe Abschnitt 3.3.1) ergibt:

$$TP_{IP} = TP_{rel,IP} \cdot TP_{max,IP} \quad (4.11)$$

Die Datendurchsätze auf TCP- sowie Applikationsebene können durch Berücksichtigung der IP- bzw. TCP-Header nach Gleichung 3.6 sowie 3.8 errechnet werden.

### 4.2.3. Umsetzung in der Simulationsumgebung

Innerhalb der Simulationsumgebung erfolgt die Umsetzung des Netzlastmodells durch die Verwendung von Zufallszahlengeneratoren (engl. Random Number Generator, RNG). Pro Segment der abschnittsweise linearen Wahrscheinlichkeitsverteilung werden zwei RNGs benötigt.

Ein RNG wird verwendet, um das Segment des nächsten Zeitintervalls zu bestimmen. Hierzu wird der gleichverteilte Zufallswert auf eine Zeile der Übergangsmatrix der Markovkette abgebildet. Der zweite RNG bestimmt die Position bzw. den Offset auf dem linearen Abschnitt. Diese Kombination aus Segment und Offset beschreibt einen relativen Datendurchsatz auf IP-Ebene, der mit Gleichung 4.9 in die Anzahl zusätzlicher UE überführt werden kann.

Abbildung 4.5 verdeutlicht das Prinzip anhand eines Beispiels. Initial ist eine Kombination aus Segment Nr. 4 und einem Offset von 80 % bzw. 0,8 aktiv. Am Ende des ersten Zeitintervalls bestimmt der erste RNG eine Transition von Segment 4 zu Segment 3, in der Abbildung angedeutet durch die Wahrscheinlichkeit  $p_{4,3}$ . Der zweite RNG von Segment 3, welches nun aktiv ist, setzt den Offset auf 20 % ( $p_{0,2}$ ). Die nächste Transition führt zu Segment 6 und einem Offset von 15 %, gefolgt von einer Selbsttransition in Schritt 3 mit mit einem Offset von 75 %. Dieser durch die RNGs gesteuerte Prozess wird entsprechend fortgeführt.

### 4.2.4. Validierung

Zur Validierung des Konzeptes und zur Verifikation der Umsetzung in der Simulationsumgebung wurden zunächst stationäre Szenarien untersucht. Bei diesen stationären Szenarien wurden alle Kombinationen aus festen CQI-Werten von  $\{30, 25, 24, 23, 22, 21, 20, 18\}$  sowie zusätzlich aktiven UE von  $\{0, 0,5, 1, 2, 2,5, 3, 4\}$  betrachtet und die gemessenen mit den nach Gleichung 4.6 bzw. der verallgemeinerten Gleichung 4.10 errechneten Da-

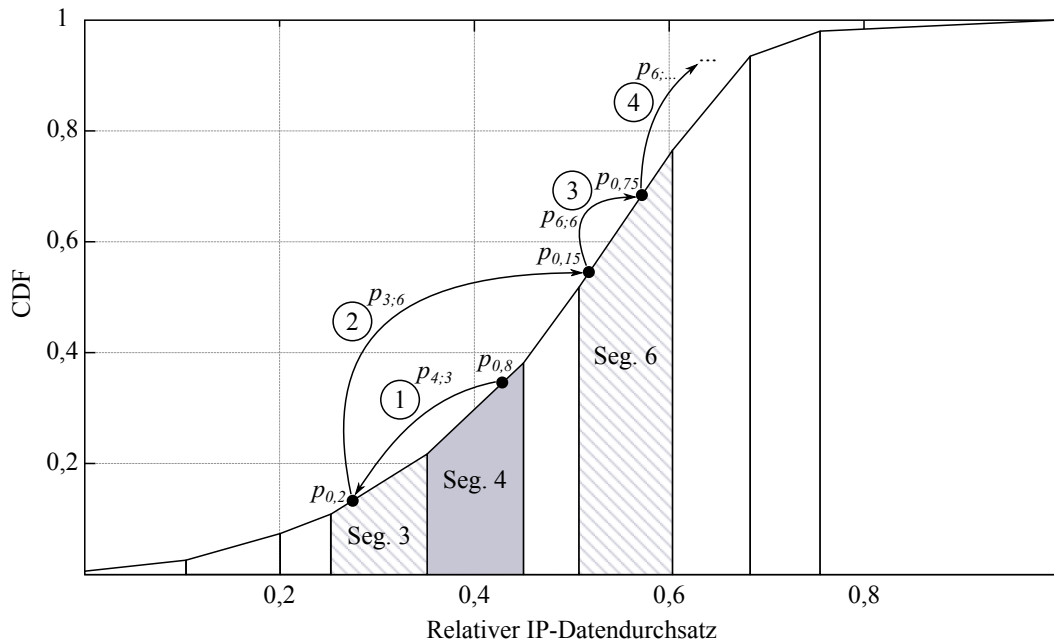


Abbildung 4.5.: Beispiel Ablauf Netzlastmodell

tendurchsätzen verglichen. Es ergaben sich nahezu perfekte Ergebnisse mit Abweichungen, die dauerhaft unter 1% lagen.

Im zweiten Schritt wurde das dynamische Verhalten des Netzlastmodells evaluiert. Der Aufbau der Simulationsumgebung gleicht dem der Messfahrten und besteht aus einem Client-Server-Paar, das über ein HSDPA-Netzwerk miteinander verbunden ist. Der Server sendet eine große Datei per TCP zum Client, was dem HTTP-Download während der Messfahrten entspricht. Auf Seite des Client-UE werden die gemessenen CQI-Werte appliziert, und es findet ein Logging der Datendurchsätze auf IP-Ebene statt. Mit diesem Aufbau werden nun alle Messfahrten simuliert. Abbildung 4.6 zeigt den entsprechenden Aufbau der Simulationsumgebung.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Fahrten genau um die Datensätze handelt, die zur Erzeugung des Netzlastmodells verwendet wurden. Ziel dieser Validierung ist die Erbringung des Nachweises, dass die Anwendung des Netzlastmodells in der Simulation Ergebnisse liefert, die mit denen während der Messungen übereinstimmen. Die Übertragbarkeit auf zukünftige Fahrten stand nicht im Fokus.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation mit den gemessenen Daten für beide Teststrecken verglichen. Abbildung 4.7 zeigt die kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen des relativen Datendurchsatzes auf IP-Ebene für die CQI-Werte im Bereich 22-30 sowie die Abweichung zwischen den Kurven. Die Daten dieses CQI-Bereichs wurden in den vorangegangenen Erklärungen als Referenzdaten verwendet. Simulierte wie gemessene Daten stimmen gut überein, der mittlere absolute Fehler beträgt für Strecke 1 2 %, für Strecke 2 2,5 %. Die Berechnung des mittleren absoluten Fehlers erfolgte für die

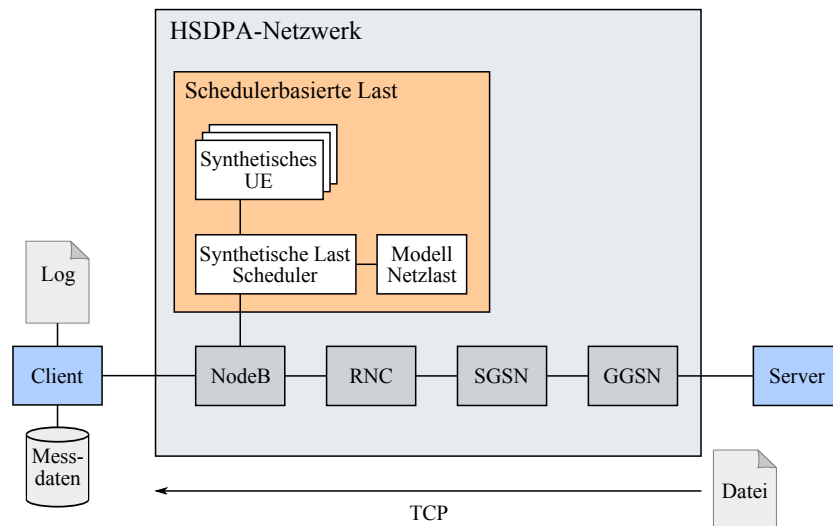


Abbildung 4.6.: Aufbau zur Validierung der schedulerbasierten Lasterzeugung

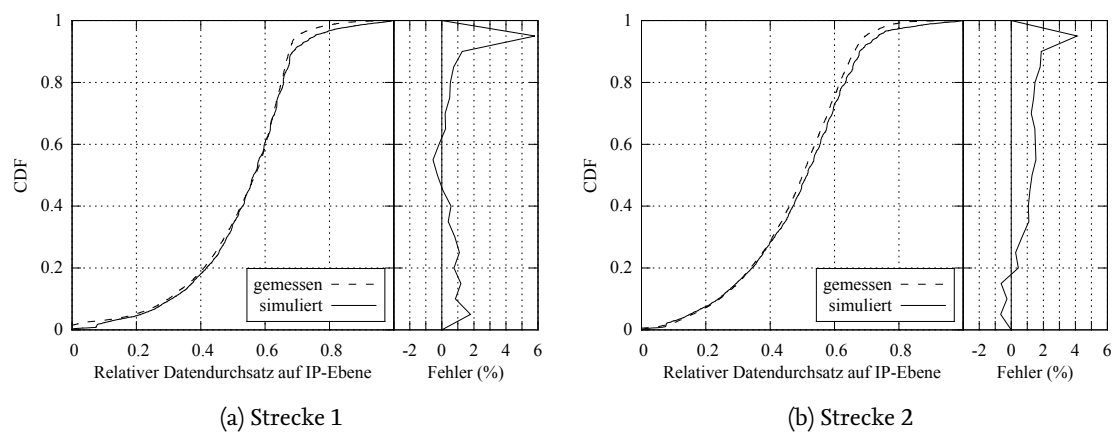


Abbildung 4.7.: CDF des relativen Datendurchsatzes auf IP-Ebene für CQI 22-30 sowie die Abweichung (in 5%-Schritten als Differenz, bezogen auf die gemessenen Daten)

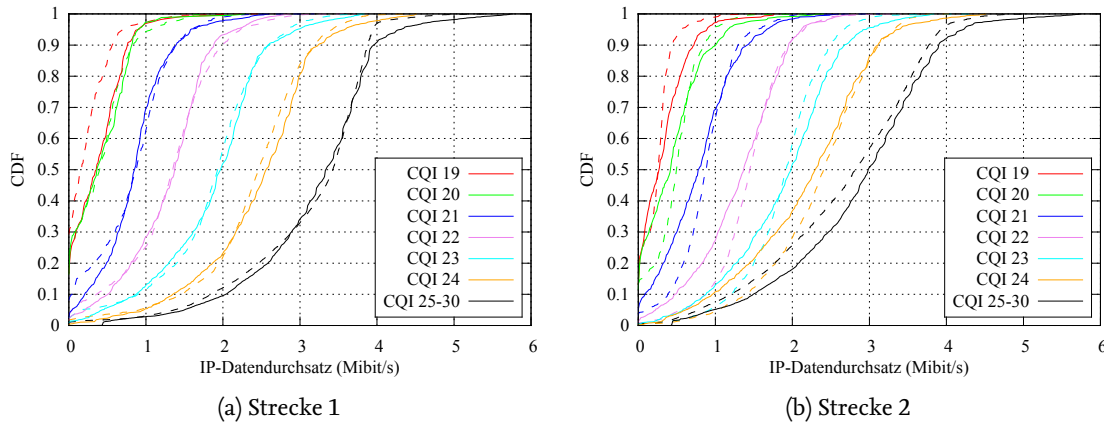


Abbildung 4.8.: CDF der absoluten Datendurchsätze auf IP-Ebene. Durchgezogene Linie: simulierte Daten, gestrichelte Linie: gemessene Daten.

5te bis 95te Perzentile in 5%-Schritten und ist bezogen auf die gemessenen Daten.

Abbildung 4.8 vergleicht die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der absoluten IP-Datendurchsätze auf CQI-Basis. Die empirisch verbesserten Korrekturfaktoren führen im Fall von Strecke 1 zu einer besseren Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Daten verglichen mit Strecke 2. Die Abweichung der einzelnen Kurven auf CQI-Ebene kann mit dem Verfahren zur Herleitung des Modells erklärt werden, welches auf den gemittelten Werten des CQI-Bereichs 22-30 basiert.

Die Überprüfung des dynamischen Verhaltens, also der zeitlichen Abfolge, erfolgt durch Vergleich der Übergangswahrscheinlichkeiten dreier exemplarischer Segmente der abschnittsweise linearen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Wie Abbildung 4.9 für die Segmente 0, 4 und 7 zeigt, stimmen gemessene wie simulierte Werte gut überein.

## 4.3. Zusammenfassung

Simulationsumgebungen sind mächtige Werkzeuge, um neue mobile Anwendungen zu entwickeln. Da die Leistungsfähigkeit der Luftschnittstelle einen großen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der mobilen Anwendungen hat, muss der drahtlose Datenkanal so realistisch wie möglich nachgebildet werden. Dies beinhaltet insbesondere die Generierung der Netzlastlast, die von gleichzeitig aktiven Nutzern hervorgerufen wird.

In diesem Kapitel wurde ein Softwarewerkzeug vorgestellt, mit dem die Datenverteilung von einem zentralen Server an Fahrzeuge simuliert werden kann. Die Software besteht aus zwei Komponenten bzw. Schichten. Die Simulation des Kommunikationsnetzwerks, also die Übertragung von Daten über HSDPA mittels TCP/IP, basiert auf dem Netzwerksimulator *ns-2* [64], der Erweiterung *Eurane* [31] sowie dem von [65] vorgestellten Modul zur Durchführung von Zellwechseln. Die zweite Komponente ist die Logik des Servers sowie der Clients. Die aus den Messungen abgeleitete Konfiguration des Netzwerksimulators

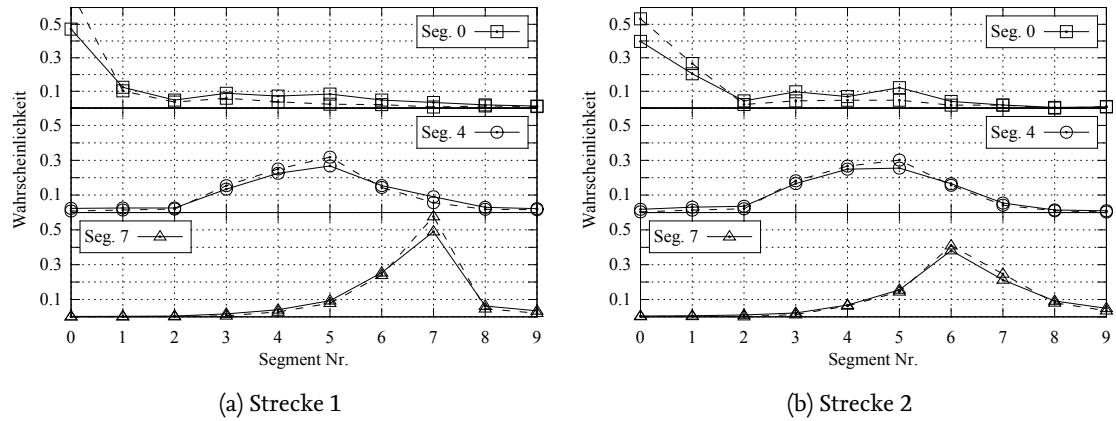


Abbildung 4.9.: Übergangswahrscheinlichkeiten der abschnittsweise linearen Verteilungsfunktion für die Segmente 0, 4 und 7. Durchgezogene Linie: simulierte Daten, gestrichelte Linie: gemessene Daten.

wurde angegeben.

Ein neuartiger, speziell für HSDPA entwickelter Netzlastgenerator erzeugt die Last, indem zusätzliche, synthetische Endgeräte an der Ressourcenverteilung im Scheduler des NodeB teilnehmen. Diesen synthetischen Endgeräten werden Ressourcen der Luftschnittstelle zugeordnet, wodurch die gewünschte Netzlast entsteht. Das Netzlastmodell, also die Beschreibung der Anzahl aktiver synthetischer Endgeräte als Funktion der Zeit, wurde aus den im Kapitel 3 beschriebenen Datendurchsatzmessungen abgeleitet. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Luftschnittstelle während der Messungen an der Kapazitätsgrenze betrieben wird. In diesem Fall hängt der in einem Zeitintervall erreichte Datendurchsatz von der Ressourcenverteilung durch den Scheduler ab, der Datenfluss ist weitgehend von den Steuerungsmechanismen von TCP entkoppelt.

Abschließend wurde das vorgestellte Verfahren zur schedulerbasierten Lastgenerierung durch Vergleich der gemessenen mit den simulierten Daten erfolgreich validiert. Die Ergebnisse zeigen die Eignung des Verfahrens, die simulierten Daten kommen der Realität sehr nahe.



# 5 Optimierte Datenübertragung

Die für die optimierte Datenübertragung benötigten Komponenten wurden in Abbildung 4.1 des vorherigen Kapitels bereits benannt und sollen nun detailliert beschrieben werden.

Um die Übertragung von Datenobjekten von einem zentralen Server zu per HSDPA mit dem Internet verbundenen Fahrzeugen zu optimieren, ist zunächst ein Modell nötig, mit dem die für die Optimierung benötigten Parameter geschätzt werden können. Das Ziel der Optimierung, die Maximierung der Ausnutzung des Mobilfunkkanals bei gleichzeitiger Berücksichtigung von spätesten Zustellzeitpunkten, verlangt die Schätzung zweier Parameter: die benötigte Dauer sowie die resultierende Kanalausnutzung für die Übertragung eines Datenobjekts unter Verwendung von TCP/IP.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird ein neuartiges kennlinienbasiertes Modell vorgestellt, mit dem die benötigten Parameter berechnet werden können. Neben der Größe des Datenobjektes benötigt das Modell den während der Übertragung zu erwartenden Verlauf des CQI sowie die Anzahl gleichzeitig aktiver UE.

Auf Basis dieses Modells können die anschließend vorgestellten Optimierungsverfahren eine geeignete Sendereihenfolge der wartenden Datenobjekte ermitteln, indem mögliche Lösungen evaluiert, also bezüglich ihrer Eignung bewertet werden. Abbildung 5.1 zeigt vorgreifend auf die folgenden Erklärungen die entsprechenden Komponenten und deren Zusammenhänge.

## 5.1. Modell TCP über HSDPA

Für die Optimierung der Datenübertragung ist es nötig, die Dauer sowie die erzielte Kanalausnutzung für jedes zu übertragene Datenobjekt möglichst genau zu schätzen, um hierauf aufbauend eine geeignete Sendereihenfolge zu finden. Im Folgenden soll ein Modell vorgestellt werden, mit dem die Übertragungsdauer sowie die Kanalausnutzung unter wechselnden Kanalqualitäten (wechselnden CQI) sowie wechselnden, gleichzeitig aktiven UE geschätzt werden können. Das Modell verwendet einen kennlinienbasierten Ansatz und berechnet die übertragenen Datenmengen durch Aufsummieren bzw. Integrieren.

### 5.1.1. Verwandte Arbeiten

In der Literatur sind bereits diverse Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit sowie zur Modellierung der TCP-basierten Datenübertragung zu finden. Das bekannteste Modell ist sicherlich das Modell von *Padhye et al.* [78, 79]. Dieses analytische Modell erlaubt die Berechnung des Datendurchsatzes im stationären Zustand, also während der Übertragung großer Datenmengen wie z.B. einem Datentransfer mit FTP. Als Eingangsparameter benötigt das Modell lediglich zwei Parameter, die Paket-Verlustrate sowie die Round Trip

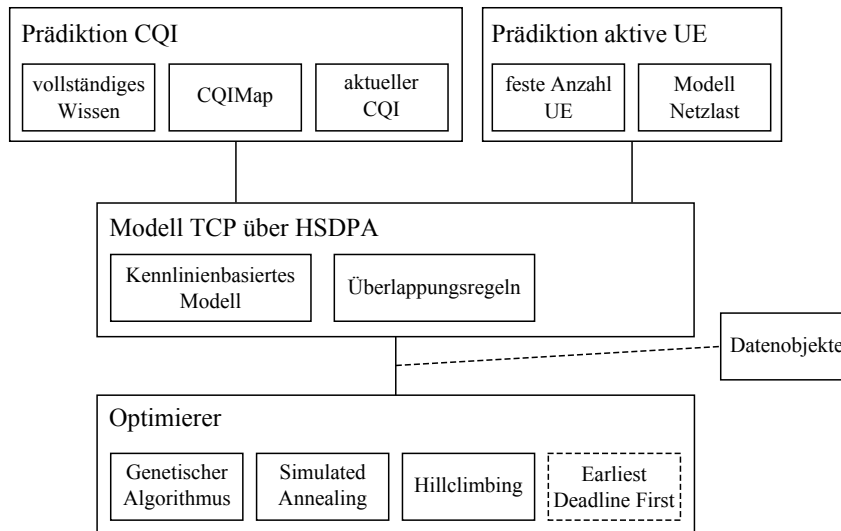


Abbildung 5.1.: Komponenten der optimierten Datenübertragung

Time (RTT).

Auf Basis dieser Arbeit schlagen [80, 16] sowie [62] Anpassungen speziell für HSDPA vor. In [80, 16] wird das Padhye-Modell erweitert, indem die Wechselwirkungen von TCP mit dem HARQ-Mechanismus sowie den im NodeB verwendeten Scheduling-Verfahren einbezogen werden. Das Modell berücksichtigt neben dem stationären Zustand den Slow-Start sowie die Überlastkontrolle von TCP (Recovery und Retransmission Timeouts).

Die Arbeit von [62] lässt das Padhye-Modell unverändert und modelliert die von diesem benötigte Paket-Verlustrate sowie die RTT. Hierzu wird ein sogenanntes Queuing-Modell verwendet, über das der Datenfluss zwischen den Puffern im RNC sowie den Priority-Queues im NodeB über die Iub-Flusskontrolle simuliert wird (siehe Abschnitt 2.3.2). In einem iterativen Verfahren kann durch Abgleich des Queuing-Modells mit dem Padhye-Modell die resultierende TCP-Datenrate ermittelt werden.

Beide Modelle haben signifikante Einschränkungen, die die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit ausschließen. Neben einer festen Anzahl zusätzlich aktiver UE ist keine zeitgenaue Angabe der verwendeten Kanalqualitäten bzw. der drauf basierenden Modulations- und Kodierungsverfahren möglich. Stattdessen ist es lediglich möglich, entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. Häufigkeiten zu definieren. Das Modell von [62] behandelt zudem alle Nutzer als identisch, individuelle Modellierungen von Kanalqualitäten können nicht vorgenommen werden.

### 5.1.2. Kennlinienbasiertes Modell

Die Übertragung eines Datenobjektes über TCP beginnt mit der Slow-Start-Phase, bei der sich der Sender durch sukzessive Steigerung der Datenrate der Kapazitätsgrenze des Übertragungskanal annähert. Der Sender erkennt das Überschreiten dieser Kapazitätsgrenze anhand von Paketverlusten und reduziert zur Vermeidung weiterer Überlastungen die Datenrate.



Wie in Abschnitt 2.7 diskutiert hebeln die innerhalb des HSDPA-Netzes vorhandenen Pufferkapazitäten diese Stauvermeidungsmechanismen größtenteils aus, und es kommt zum Bufferbloat-Effekt. Der Datendurchsatz wird nun durch den maximalen Datendurchsatz der Luftschnittstelle sowie die Ressourcenverteilung des Schedulers bestimmt und ist damit abhängig vom aktuellen CQI sowie der Anzahl gleichzeitig aktiver UE.

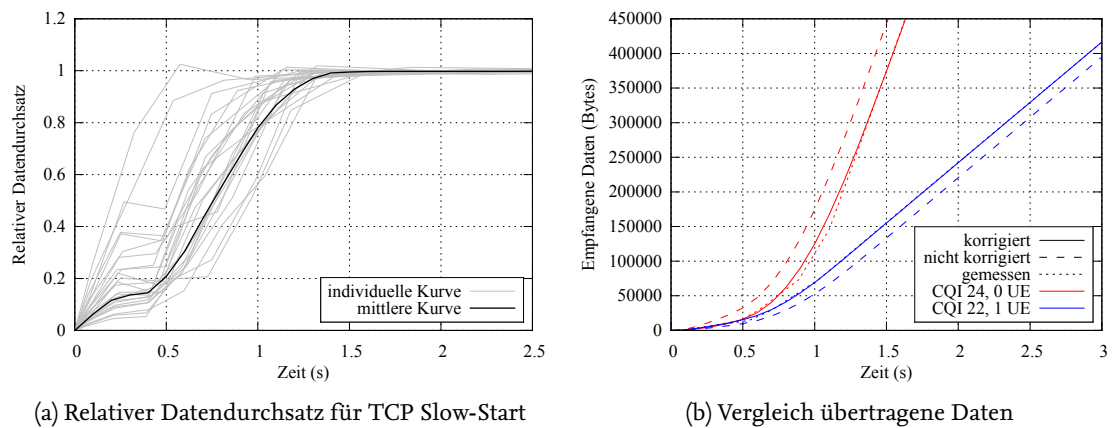


Abbildung 5.2.: Datendurchsatz und empfangene Daten für TCP Slow-Start

Die folgenden Betrachtungen lassen sich sowohl auf die IP-, die TCP- sowie die Applikationsschicht anwenden, da nach Abschnitt 3.3.1 ein linearer Zusammenhang zwischen den jeweiligen Datendurchsätzen besteht. Daher wird der Begriff Datendurchsatz ohne weitere Einschränkung verwendet.

In der Simulationsumgebung wurde zunächst die Datenübertragung per TCP für verschiedene Kombinationen aus CQI und weiteren gleichzeitig aktiven UE durchgeführt. Die CQI-Werte lagen dabei im Bereich von 20 - 25, und es waren 0, 1, 2 sowie 3 weitere UE aktiv. Abbildung 5.2a zeigt den gemessenen relativen Datendurchsatz nach Gleichung 4.1 als Funktion der Zeit. Es ist zu erkennen, wie die Datenrate in der Slow-Start-Phase steigt, bis schließlich die Sättigung der Luftschnittstelle mit einem relativen Durchsatz von 1 erreicht wird. Aus diesen individuellen Kurven wurde eine mittlere Kurve berechnet, die in Abbildung 5.2a hervorgehoben eingezeichnet ist. Dabei handelt es sich um einen gewichteten Mittelwert, der die Häufigkeit der Kombination aus CQI und Anzahl gleichzeitig aktiver UE innerhalb der aufgezeichneten Rohdaten berücksichtigt. Diese Häufigkeiten können den im Abschnitt 3.4 angegebenen CQI-Verteilungen sowie der in Abschnitt 4.2.2 zur Herleitung des Netzlastmodells verwendeten Verteilung des Datendurchsatzes entnommen werden.

Die Streuung der individuellen Kurven zeigt, dass es je nach CQI und Anzahl gleichzeitig aktiver UE unterschiedlich lange dauert, bis die Puffer ausreichend gefüllt und der maximale Datendurchsatz erreicht ist. Am linken Rand des Spektrums liegen die Kurven für CQI 20 und 2 bzw. 3 aktive UE. Diese Kombinationen weisen im Vergleich den geringsten absoluten Datendurchsatz auf, so dass die Puffer schnell von TCP gefüllt werden

können. Am rechten Rand hingegen sind die Kurven für CQI 25, 24 und 23 sowie 0 aktive UE zu finden, also die Kombinationen mit den höchsten Datendurchsätzen. Das Füllen der Puffer dauert hier entsprechend länger.

Die mittlere Kurve, im Folgenden Kennlinie bzw. Datendurchsatzkennlinie genannt, kann nun verwendet werden, um die in einer Zeitspanne übertragenden Daten durch Aufsummierung oder Integrieren zu berechnen. Wie in Abbildung 5.2a zu erkennen ist, weichen mittlere und individuelle Kurven zum Teil deutlich voneinander ab. Diese Abweichungen führen dazu, dass signifikante Fehler bei der Schätzung der Übertragungsdauer entstehen. Daher wurden Korrekturfaktoren  $CF$  eingeführt, die gemäß Gleichung 5.1 in Abhängigkeit der Zeit  $t$  sowie individueller Basisfaktoren  $BF_{CQI,UE}$  errechnet werden. Mit diesen Korrekturfaktoren werden die Werte der Datendurchsatzkennlinie  $CV_{avg}$  multipliziert, es ergeben sich die korrigierten Werte  $CV$ .

$$CF(t, CQI, UE) = \begin{cases} 1 + (1,8 - t)^2 \cdot BF_{CQI,UE} & t < 1,8 \text{ s} \\ 1 & t \geq 1,8 \text{ s} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$CV(t, CQI, UE) = CV_{avg}(t) \cdot CF(t, CQI, UE) \quad (5.2)$$

Die Basisfaktoren wurden für alle Kombinationen aus CQI und gleichzeitig aktiven UE so gewählt, dass der Fehler zwischen gemessener und berechneter Datenmenge für die Zeit  $t = 1,8 \text{ s}$  minimal ist. Bei  $t = 1,8 \text{ s}$  geht die Kennlinie in eine Konstante (mit Wert 1) über und verläuft damit parallel zu den individuellen Kurven. Somit kommt es zu keinen weiteren Fehlern beim Integrieren, der Korrekturfaktor  $CF$  geht in den Wert 1 über. Abbildung 5.2b zeigt die gemessenen sowie die durch Integration der Kennlinie berechneten Datenmengen als Funktion der Zeit für zwei exemplarische Kombinationen aus CQI und gleichzeitig aktiven UE. Es ist deutlich zu erkennen, dass die korrigierte Kennlinie in beiden Fällen zu einem signifikant besseren Ergebnis führt. Dennoch bleiben kleinere Abweichungen bestehen, wie im Fall der rot dargestellten Kombination {CQI 24, 0 gleichzeitig aktive UE} im Bereich von 0,75 s - 1,4 s.

Anhand der korrigierten Kennlinie kann mittels Integration die Menge übertragener Daten berechnet werden, Neben der Kennlinie müssen noch der Verlauf des CQI sowie die Anzahl gleichzeitig aktiver UE berücksichtigt werden. Diese beiden Größen bestimmen nach Abschnitt 4.2.2.3 den absoluten maximal möglichen Datendurchsatz, auf den sich die relativen Kennlinienwerte beziehen.

Abbildung 5.3 illustriert das Verfahren anhand der Berechnung der benötigten Übertragungsdauer ( $t_{End} - t_0$ ) für ein Datenobjekt der Größe  $Size_{Object}$ . Im ersten Schritt werden anhand der Verläufe von CQI, Anzahl gleichzeitig aktiver UE sowie der Kennlinie die Abschnittsgrenzen identifiziert. Eine Abschnittsgrenze wird eingefügt, wenn sich i) der CQI bzw. ii) die Anzahl gleichzeitig aktiver UE ändert oder wenn iii) ein neuer Kennlinienstützpunkt vorliegt. Im vorliegenden Beispiel wurden sieben Abschnitte identifiziert, die bei den Zeitpunkten  $t_0$  bis  $t_6$  beginnen. Für jeden Abschnitt  $i$  ( $i > 0$ ) kann die am Ende (also zu  $t_i$ ) übertragene Datenmenge  $D_i$  durch folgende auf der Trapezformel basierende Gleichung errechnet werden:

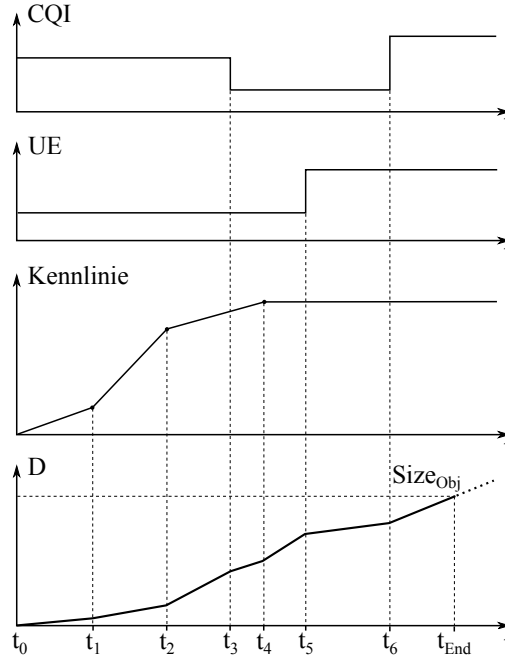


Abbildung 5.3.: Kennlinienbasierte abschnittsweise Integration

$$D_i = D_{i-1} + \frac{1}{2} (TP(t_{i-1}, CQI, UE) + TP(t_i, CQI, UE)) \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (5.3)$$

$$D_0 = 0 \quad (5.4)$$

Der absolute Datendurchsatz  $TP$  berechnet sich als Produkt des maximalen Datendurchsatzes  $TP_{max}$  und des jeweiligen korrigierten Wertes der Kennlinie  $CV$ :

$$TP(t, CQI, UE) = TP_{max}(CQI, UE) \cdot CV(t, CQI, UE) \quad (5.5)$$

Der maximale Datendurchsatz  $TP_{max}$ , der vom CQI sowie der Anzahl gleichzeitig aktiver UE abhängig ist, ergibt sich nach Gleichung 5.6 als Produkt des CQI-abhängigen maximal erreichbaren Datendurchsatzes des HSDPA-Kanals  $TP_{max}(CQI)$  nach Gleichung 3.4 und des vom Scheduler zugeteilten Ressourcenanteils  $TP_{rel}(CQI, UE)$  nach Gleichung 4.10. Der Ressourcenanteil ist wegen der CQI-abhängigen Degradierung sowohl vom CQI als auch von der Anzahl gleichzeitig aktiver UE abhängig.

$$TP_{max}(CQI, UE) = TP_{max}(CQI) \cdot TP_{rel}(CQI, UE) \quad (5.6)$$

Die benötigte Dauer  $T_{Transmit} = t_{End} - t_0$  für die Übertragung eines Objektes ergibt sich gemäß Abbildung 5.3 als Schnittpunkt der Datensummenlinie ( $D$ ) mit der Objektgröße  $Size_{Obj}$  und kann durch Inter- bzw. Extrapolation berechnet werden.

Die Kanalausnutzung  $u$  wird ebenfalls abschnittsweise berechnet und ergibt sich gewichtet über die in den jeweiligen Abschnitten (bzw. Abschnittsteilen) übertragenen Datenmengen (im Abschnitt  $i$  werden  $D_i - D_{i-1}$  Daten übertragen):

$$u = \frac{1}{Size_{Obj}} \sum_{i=1}^n u_i \cdot (D_i - D_{i-1}) \quad (5.7)$$

Die CQI-abhängige Kanalausnutzung  $u_i$  ist als Quotient aus der aktuellen Transportblockgröße  $Size_{HS-PDU}(CQI_i)$  und der maximalen Transportblockgröße  $Size_{HS-PDU,max}$  definiert. Letztere ist die Größe eines Transportblocks für CQI 30.

$$u_i = \frac{Size_{HS-PDU}(CQI_i)}{Size_{HS-PDU,max}} \quad (5.8)$$

### 5.1.3. Überlappung von Datenobjekten

Die Übertragung der einzelnen Datenobjekte zu den in derselben Zelle befindlichen UE kann auf verschiedene Arten erfolgen. Der Begriff Art meint dabei, wie die einzelnen Objekte zueinander zeitlich in Bezug stehen.

Prinzipiell ist es natürlich möglich, alle Datenobjekte sofort nach Bekanntwerden vom Server zu den Endgeräten zu übertragen. Allerdings kann in diesem Fall die Optimierungsstrategie keinen Einfluss auf die Übertragungszeitpunkte und damit auf die geschätzten Übertragungsdauern und Kanalausnutzungen nehmen, faktisch findet keine Optimierung statt. Des weiteren entspricht das parallele Versenden von Datenobjekten nicht den Bedingungen, die während der in Kapitel 3 vorgestellten Messungen geherrscht haben. Während der Datendurchsatzmessungen war genau ein UE (das für die Messungen verwendete Modem) aktiv, beim parallelen Versenden sind es mehrere UE. Dieser Unterschied kann einen Einfluss auf das Verhalten anderer Nutzer haben, so dass der in Abschnitt 4.2 vorgestellte Netzlastgenerator nicht angewendet werden darf.

Um einerseits die Anwendbarkeit des Netzlastmodells sicherzustellen und andererseits die Flexibilität beim Finden einer optimalen Sendereihenfolge zu gewährleisten, werden die Datenobjekte sequenziell, also zeitlich nacheinander, verschickt. Um einen konstanten Datenfluss zu erreichen, werden aufeinander folgende Datenobjekte ineinander verschachtelt, so dass es zu Überlappungen zwischen Vor- und Nachfolgeobjekt kommt. Ohne diese Überlappung würde ein streng sequentielles Senden (der Nachfolger startet, wenn der Vorgänger vollständig übertragen ist) bedingt durch den TCP Slow-Start am Beginn der Übertragung eines Objektes zu keinem kontinuierlichen Datenfluss führen. Die während der Messungen vorherrschenden Bedingungen wären nicht erfüllt.

Abbildung 5.4 zeigt die Überlappung von Datenobjekten, wobei folgende Regeln bezüglich der Überlappungsdauer  $T_{Overlap}$  definiert wurden. Diese gleichzeitig geltenden Regeln garantieren einen kontinuierlichen Datenfluss einerseits und vermeiden auf der anderen Seite Doppelüberlappungen, also Überlappungen von Vorgänger und Nachfolger eines Objektes.

1. Ein Vorgängerobjekt  $n-1$  darf durch einen Nachfolger  $n$  maximal zur Hälfte überlappt werden:

$$T_{Overlap} \leq \frac{T_{Transmit,n-1}}{2} \quad (5.9)$$

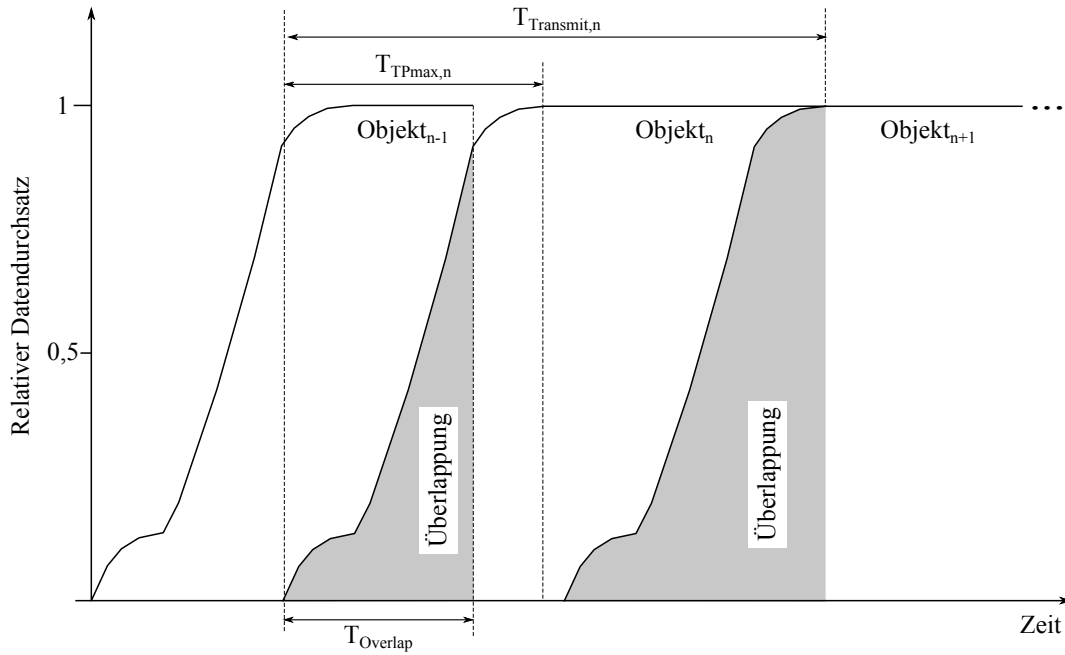


Abbildung 5.4.: Überlappung von Datenobjekten

- Ein Datenobjekt  $n$  darf durch seinen Vorgänger  $n-1$  maximal zur Hälfte überlappt werden:

$$T_{\text{Overlap}} \leq \frac{T_{\text{Transmit},n}}{2} \quad (5.10)$$

- Die Überlappung des Vorgängers  $n-1$  muss beendet sein, wenn der maximale relative Datendurchsatz des Objektes  $n$  erreicht ist (nach einer Dauer von  $T_{\text{TPmax},n}$ ):

$$T_{\text{Overlap}} \leq T_{\text{TPmax},n} \quad (5.11)$$

Die Überlappung von Datenobjekten hat einen Einfluss auf die Übertragungsdauer von Vorgänger- sowie Nachfolgeobjekt und muss daher bei der Berechnung der Übertragungsdauern und Kanalausnutzungen beachtet werden. Abbildung 5.5 illustriert dies an einem Beispiel für ein Objekt  $n$ , das von einem Nachfolgeobjekt  $n+1$  überlappt wird.

Zunächst wird die Übertragungsdauer  $T_{\text{Transmit},n}$  des Objektes  $n$  berechnet, die sich ohne Überlappung durch ein Nachfolgeobjekt ergeben würde. Anhand oben formulierter Regeln 1-3 kann nun der früheste Übertragungsbeginn des Nachfolgeobjektes  $n+1$  berechnet werden, der in Abbildung 5.5 als  $t_{n+1}$  bezeichnet wird.

Bedingt durch die Überlappung durch Objekt  $n+1$  steigt aus Sicht von Objekt  $n$  die Anzahl gleichzeitig aktiver UE im Überlappungsbereich, was in der UE-Kurve (obere Kurve) entsprechend angedeutet ist. Diese Erhöhung der gleichzeitig aktiven UE, die dem Flächeninhalt unter der relativen Datendurchsatzkurve des Nachfolgeobjektes entspricht, führt zu einer Verlängerung der geschätzten Übertragungsdauer von Objekt  $n$  von ursprünglich  $T_{\text{Transmit},n}$  zu  $T'_{\text{Transmit},n}$ . Allerdings wird Objekt  $n$  nun um mehr als die Hälfte vom Nachfolgeobjekt überlappt, so dass Regel 1 verletzt ist. Als Konsequenz muss der

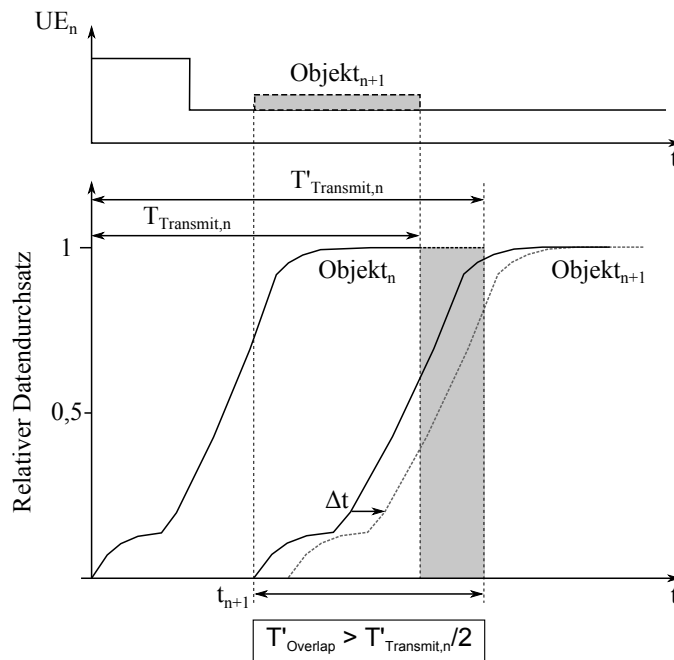


Abbildung 5.5.: Einfluss Überlappung auf Übertragungsdauer

Übertragungsbeginn von Objekt  $n+1$  um  $\Delta t$  nach hinten geschoben werden, um Ungleichung 5.9 zu genügen. Obige Betrachtungen müssen nun für den verschobenen Übertragungsbeginn von Objekt  $n+1$  erneut durchgeführt werden, so dass sich ein iterativer Prozess zur Berechnung eines gültigen Übertragungsbeginns des Nachfolgeobjektes ergibt.

Analog hat die Überlappung auch einen Einfluss auf die Übertragungsdauer von Objekt  $n+1$ , was aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 5.5 nicht dargestellt ist.

Sukzessive können nun für alle Datenobjekte die Zeitpunkte des Übertragungsbeginns, die Übertragungsdauern und die jeweiligen Kanalausnutzungen berechnet werden.

#### 5.1.4. Vorhersage von CQI-Werten

Für das in den vorherigen Abschnitten vorgestellte Modell zur Berechnung von Übertragungsdauern und Kanalausnutzungen ist es nötig, die CQI-Werte der beteiligten UE zu prädictieren. Hierfür wurden drei Verfahren implementiert, die im Rahmen der in Kapitel 6 vorgestellten Evaluation angewendet werden.

Das Vorhersagemodell „vollständiges Wissen“ verfügt über exaktes Kontextwissen, es stehen die von den UE während der Simulation angewendeten CQI-Werte vorab zur Verfügung. Diese fehlerfreie Prädiktion erlaubt damit die Bewertung des Datenübertragungsmodells sowie der Optimierungsverfahren ohne den Einfluss fehlerhafter CQI-Vorhersagen.

Das Modell „CQIMap“ verwendet als Datenquelle die in Kapitel 3 vorgestellte CQI-Karte. Die Prädiktion erfolgt durch Extrapolation der von den UE gemeldeten Fahrzeugpositionen entlang der befahrenen Route. Zur Berechnung der zukünftig zurückgelegten

	Strecke 1	Strecke 2
$\overline{TP}_{rel,IP}$	0,525	0,477
$\overline{N}_{Additional}$	0,95	1,138

Tabelle 5.1.: Mittlerer Datendurchsatz und mittlere Anzahl gleichzeitig aktiver UE

Strecke  $\Delta s$  während der Zeit  $\Delta t$  wird nach Gleichung 5.12 die zuletzt bekannte Geschwindigkeit  $v_{Current}$  verwendet, die als konstant angenommen wird.

$$\Delta s = v_{Current} \cdot \Delta t \quad (5.12)$$

Bei den in der CQI-Karte abgelegten Werten handelt es sich um gemittelte historische CQI-Werte, die damit von den tatsächlich während der Simulation angewendeten Daten, die nicht Teil der Karte sind, abweichen können. Damit spiegelt dieses Verfahren die Verhältnisse realitätsnah wider.

Das Modell „aktueller CQI“ verfügt über keine Vorhersagemöglichkeiten, es wird der zuletzt von den UE gemeldete CQI verwendet. Dieses Verfahren kann als Referenz für das Fehlen einer CQI-Prädiktion betrachtet werden.

### 5.1.5. Vorhersage gleichzeitig aktiver UE

Für die in Kapitel 6 vorgestellte Evaluation der erarbeiteten Algorithmen und Verfahren werden auf zwei unterschiedliche Verfahren gleichzeitig aktive UE erzeugt. Im Modus „feste Anzahl UE“ ist dauerhaft eine feste Anzahl UE aktiv. Diese Anzahl beträgt 0, 1 bzw. 2. Analog zum CQI-Vorhersagemodell „vollständiges Wissen“ ist im Modus „feste Anzahl UE“ keine Prädiktion nötig, die Anzahl gleichzeitig aktiver UE ist vorab bekannt.

Bei der Verwendung des in Abschnitt 4.2 vorgestellten Netzlastmodells wird die während der Messfahrten ermittelte mittlere Anzahl gleichzeitig aktiver UE  $\overline{N}_{Additional}$  verwendet. Diese kann unter Verwendung von Gleichung 4.9 aus dem Mittelwert des relativen Datendurchsatzes  $\overline{TP}_{rel,IP}$  errechnet werden. Tabelle 5.1 gibt die entsprechenden Werte für beide Strecken an. Es werden somit aus historischen Daten abgeleitete Beobachtungen verwendet.

## 5.2. Optimierungsproblem

Das Ziel der optimierten Übertragung von Datenobjekten von einem zentralen Server zu Fahrzeugen ist, die Ausnutzung des HSDPA-Kanals zu maximieren und gleichzeitig individuelle späteste Zustellzeitpunkte zu beachten. Im Falle der beschriebenen sequenziellen Datenübertragung muss also pro Mobilfunkzelle, in der sich auf Datenobjekte wartende Fahrzeuge befinden, eine Sendereihenfolge gefunden werden, die diese Kriterien bestmöglich erfüllt. Als erster Schritt der Lösung muss das Optimierungsproblem mathematisch beschrieben werden. Dies beinhaltet die Beschreibung der Datenobjekte, die Definition eines Suchraums sowie die Aufstellung einer Funktion zur Bewertung möglicher Lösungen. Die folgenden Erklärungen orientieren sich bzgl. der verwendeten Begriffe an

Eigenschaft	Beschreibung
$Size_{Obj}$	Größe des Objektes in Bytes
$t_{Av}$	Zeitpunkt der Verfügbarkeit des Objekts
$t_{Dl}$	Spätester Zustellzeitpunkt des Objekts (Deadline)
$Prio$	Priorität des Objekts

Tabelle 5.2.: Beschreibung Datenobjekt

den genetischen Algorithmen, die in Abschnitt 5.2.3 erklärt werden [81].

### 5.2.1. Beschreibung von Datenobjekten

Ein Datenobjekt ist eine Menge von Daten, die zusammenhängend, also im Rahmen eines Übertragungsvorgangs, vom Server zu einem Fahrzeug übertragen werden. Dies kann z.B. eine E-Mail oder ein Segment einer Video-Datei sein. Gemäß Tabelle 5.2 wird ein Datenobjekt durch folgende vier Eigenschaften charakterisiert: die Größe des Objekts in Bytes, der Zeitpunkt der Verfügbarkeit des Objekts beim Server, der späteste Zustellzeitpunkt beim Fahrzeug bzw. der Fahrzeugapplikation sowie die Priorität.

In Anlehnung an die Arbeit von [82] stehen drei Prioritätsstufen zur Verfügung, die folgendermaßen definiert sind:

■ Prio 1

Die Deadline  $t_{Dl}$  darf nicht überschritten werden (harte Deadline). Im Falle eines Überschreitens kommt es zu Fehlfunktionen, die Sicherheit der Fahrzeuginsassen oder anderer Verkehrsteilnehmer kann gefährdet sein.

■ Prio 2

Die Deadline  $t_{Dl}$  sollte nicht überschritten werden. Ein Überschreiten führt zu einem wahrnehmbaren Komfort- bzw. Qualitätsverlust, die Sicherheit ist nicht beeinträchtigt.

■ Prio 3

Bei der Deadline  $t_{Dl}$  handelt es sich um eine Empfehlung. Ein Überschreiten hat keinen bzw. einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Komfort bzw. die Qualität.

### 5.2.2. Suchraum und Zielfunktion

Gleichung 5.13 definiert den Suchraum  $S$ , also die Menge aller möglichen Lösungen. Für die optimierte Datenübertragung werden die Lösungen als Vektor  $C$  formuliert, der die Indizes  $c_i$  der  $n$  referenzierten Datenobjekte enthält. Ein Lösungsvektor (3,1,4,2), auch Chromosom oder Individuum genannt, beschreibt damit die Sendereihenfolge  $Objekt_3 \rightarrow Objekt_1 \rightarrow Objekt_4 \rightarrow Objekt_2$ . Jedes vorhandene Objekt muss genau einmal in  $C$  vorhanden sein, es dürfen also keine Objekte fehlen oder mehrfach berücksichtigt werden. Die Teile eines Chromosoms, in vorliegenden Fall die Indizes  $c_i$ , werden Gene genannt, die Ausprägung eines Gens, also der Wert eines Gens, heißt Allel.



$$S = \{(c_1, \dots, c_n) \mid c_1, \dots, c_n \in \{1, \dots, n\} \wedge c_i \neq c_j \text{ für } i \neq j\} \quad (5.13)$$

Die Bewertung einer möglichen Lösung  $C$  erfolgt nach Gleichung 5.14 durch die Zielfunktion  $fit(C)$  als Summe der Fitnesswerte der einzelnen Allele. Im Kontext von genetischen Algorithmen wird die Zielfunktion auch Fitnessfunktion genannt.

$$fit(C) = \sum_{i=1}^n fit(c_i) \quad (5.14)$$

Die Fitness eines Allels  $fit(c_i)$  ist definiert als die Kanalausnutzung  $u_i$  (siehe Gleichung 5.8), abzüglich eines möglichen Strafwertes  $pen_i$ .

$$fit(c_i) = u_i - pen_i \quad (5.15)$$

Der Strafwert (engl. Penalty) reduziert die Fitness, falls die Deadline eines Objektes überschritten wurde, also das Objekt zu spät beim Empfänger ankommt. Nach Gleichung 5.16 ist  $pen_i$  abhängig von der jeweiligen Priorität des Datenobjektes. Je höher die Priorität eines Objektes ist, desto größer ist der Strafwert im Falle einer Verspätung. Gemäß Abschnitt 5.2.1 sind drei Prioritätsstufen definiert, wobei *Prio* mit fallender Priorität zunimmt.

$$pen_i = \begin{cases} 0 & \text{keine Verspätung} \\ 0,5 & \text{Verspätung \& Prio} = 3 \\ 1 & \text{Verspätung \& Prio} = 2 \\ 2 & \text{Verspätung \& Prio} = 1 \end{cases} \quad (5.16)$$

Die Aufgabe der Optimierung besteht nun nach Gleichung 5.17 darin, die Lösung  $C$  aus den  $n!$  Elementen des Suchraums  $S$  zu finden, die die maximale Fitness  $fit(C)$  aufweist.

$$\max_{C \in S} fit(C) \quad (5.17)$$

Beim Finden einer Lösung  $C$  handelt es sich um ein Reihenfolgeproblem, also um ein NP-vollständiges Problem der kombinatorischen Optimierung. Analog zum *Problem des Handlungsreisenden* (engl. Traveling Salesman Problem) muss angenommen werden, dass das Finden einer optimalen Lösung einen exponentiellen Rechenaufwand erfordert. Sofern aber eine gute, suboptimale Lösung akzeptabel ist, kann diese mit Hilfe einer geeigneten Heuristik gefunden werden. Es ist kein exponentieller Rechenaufwand von Nöten [81].

Im Folgenden werden drei Verfahren zum Finden einer Lösung auf Basis der Fitness vorgestellt. Zusätzlich wird mit der Earliest Deadline First-Heuristik ein einfacher Sortieralgorithmus vorgeschlagen, der während der Evaluation als Referenzverfahren dient.

### 5.2.3. Genetischer Algorithmus

Genetische Algorithmen (GA) sind inspiriert von den Konzepten und Vorgängen der biologischen Evolution. Bei der Fortpflanzung von Organismen wird das Erbgut der Eltern rekombiniert, die Chromosomen von Vater und Mutter werden stückchenweise zu den neuen Chromosomen des Kinds zusammengesetzt. Das Kind erhält dadurch Eigenschaften beider Elternteile. Neben der Rekombination, die auch als Überkreuzung (engl. Crossover) bezeichnet wird, kommt es gelegentlich zu spontanen Änderungen, z.B. durch den Einfluss chemischer Substanzen oder radioaktiver Strahlung. Diese spontanen Änderungen werden als Mutationen bezeichnet. Getreu der von Charles Darwin aufgestellten These überleben die Individuen durch Selektion, die am besten an die Umwelt angepasst sind. Diese Konzepte werden, wenn auch sehr abstrakt, von den genetischen Algorithmen übernommen. In Anlehnung an die Natur werden mögliche Lösungen eines Problems in der Hoffnung kombiniert, eine bessere Lösung zu erhalten.

Analog zur Fortpflanzung in der Natur arbeiten genetische Algorithmen nach folgendem Zyklus:

1. Erzeugung einer initialen Population (Startpopulation)
2. Berechnung der Fitness aller Individuen der aktuellen Population
3. Selektion der „Eltern“
4. Anwendung der genetischen Operatoren Rekombination und Mutation zur Erzeugung von Kindern: Erzeugung der nächsten Generation
5. Fortsetzung mit Schritt 2.

Im Folgenden soll die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Umsetzungsform des genetischen Algorithmus erklärt werden. Eine umfassende Darstellung genetischer Algorithmen ist zum Beispiel in [81] zu finden.

Die Erzeugung der Startpopulation erfolgt durch zufällige Wahl von Individuen aus dem Suchraum  $S$ . Für jedes Individuum wird unter Verwendung von Gleichung 5.14 ein Fitnesswert berechnet, so dass ein Vergleich der Güte der assoziierten Lösungen möglich ist. Für die Erzeugung eines Kindes müssen zunächst zwei Elternteile ausgewählt werden. Hierfür wird die sogenannte Turniers Selektion (Wettkampfselektion) verwendet. Bei der Turniers Selektion werden zufällig mehrere Kandidaten aus der aktuellen Population ausgesucht, von denen der Kandidat mit der höchsten Fitness als Elternteil übernommen wird. Dieses Verfahren bietet auch schlechteren Individuen eine Chance auf Fortpflanzung.

Die Erzeugung der neuen Individuen erfolgt durch Überkreuzung der Chromosomen beider Elternteile. Hierfür wird der Crossover-Operator verwendet. Üblicherweise tauschen Crossover-Operatoren zufällig gewählte Teilsequenzen von Genen aus. Im Falle eines Reihenfolgeproblems muss aber berücksichtigt werden, dass die so erzeugten Individuen weiterhin Teil des Suchraums sind. Kein per Index referenziertes Datenobjekt darf

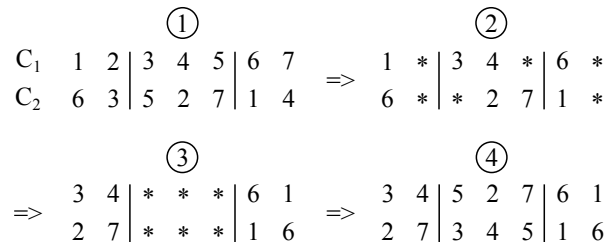


Abbildung 5.6.: Ablauf Order-Crossover

fehlen, keines darf mehrfach vorkommen. Um dieser Bedingung zu genügen, wird das sogenannte Order-Crossover verwendet, was von [83] vorgeschlagen wurde. Der Ablauf des Order-Crossovers soll anhand des in Abbildung 5.6 dargestellten Beispiels verdeutlicht werden [81, 84]:

1. Zufällige Bestimmung zweier Crossover-Punkte in den Eltern-Chromosomen  $C_1$  und  $C_2$ , zwischen denen die jeweiligen Allele ausgetauscht werden. Im vorliegenden Beispiel umfasst dieser Bereich das dritte bis fünfte Allel.
2. Ersetzung aller Allele, die aus dem anderen Chromosom übernommen werden sollen, durch einen Platzhalter '\*'. In  $C_1$  sind dies die Allele {5, 2, 7}, in  $C_2$  {3, 4, 5}.
3. Ab dem zweiten Crossover-Punkt: Schiebe alle Platzhalter nach links, bis sie sich zwischen den Crossover-Punkten befinden.
4. Ersetze die Platzhalter durch die Allele des jeweils anderen Chromosoms, die sich initial zwischen den Platzhaltern befunden haben.

Obiges Beispiel verdeutlicht auch, warum ein einfacher Austausch der Allele zwischen den Crossover-Punkten nicht anwendbar ist. Bei diesem auch „Two-Point-Crossover“ genannten Verfahren würde das erste neu erzeugte Chromosom die Indizes 2 und 7 doppelt enthalten, beim zweiten wären 3 und 4 betroffen.

Die durch Crossover erzeugten neuen Individuen werden im nächsten Schritt einer optionalen Mutation unterzogen. Mutationen sollen verhindern, dass sich der genetische Algorithmus in einem lokalem Maximum konvergiert, sich also dort „verfängt“ [81]. Hierbei ist ebenfalls darauf zu achten, dass das Chromosom nach Anwendung des Mutationsoperators Teil des Suchraums bleiben. Die zufällige Modifikation eines oder mehrerer Allele kann ebenfalls zu nicht gültigen Ergebnissen führen. Daher findet die von [85] vorgeschlagene Strukturmutation Anwendung. Bei der Strukturmutation werden zufällig zwei Gene ausgewählt und deren Inhalte, also die Allele, getauscht.

Sobald durch Wiederholung der oben beschriebenen Schritte Selektion, Crossover und optionaler Mutation die neue Population, also die nächste Generation von Individuen, erzeugt wurde, startet der Prozess erneut. Der genetische Algorithmus liefert als Ergebnis das beste zur Laufzeit gefundene Individuum zurück, unabhängig davon, in welcher Generation es gefunden wurde.

Zur Umsetzung innerhalb der Simulationsumgebung wurde die Softwarebibliothek *ecj* [86] verwendet.

#### 5.2.4. Simulated Annealing

Das heuristische Optimierungsverfahren Simulated Annealing (SimA), zu deutsch Simuliertes Abkühlen bzw. Ausglühen, ist dem Abkühlprozess von Festkörpern nachempfunden. Wenn z.B. ein Metall aufgeheizt und danach langsam abgekühlt wird, nehmen die Atome eine geordnete und stabile Kristallstruktur ein. Kristalline Defekte werden vermieden. Analog implementiert der Simulated Annealing Algorithmus einen Abkühlvorgang, bei dem in Abhängigkeit der aktuellen Temperatur Verschlechterungen der gefundenen Lösung akzeptiert werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es, lokale Maxima zu verlassen, um ein besseres Ergebnis zu finden [87, 81].

Der Ablauf des Algorithmus ist in dem an die Programmiersprache Java angelehnten Listing 2 dargestellt [87]. Initial wird zufällig ein Individuum aus dem Suchraum  $S$  ausgewählt und dessen Fitness berechnet. Dieses Individuum  $C$  wird nun mit einem Nachbarchromosom  $N$  verglichen. Analog zur Strukturmutation des genetischen Algorithmus ergibt sich ein Nachbar durch Tausch der Werte zweier Gene. Sofern der Nachbar fitter oder gleich fit ist, wird dieser als neuer Startpunkt der nächsten Iteration übernommen. Falls die Fitness des Nachbarn geringer ist, so wird dieser mit einer Wahrscheinlichkeit  $p$  übernommen, die sich nach Gleichung 5.18 in Abhängigkeit der Fitness-Differenz  $\Delta Fitness$  sowie der aktuellen Temperatur  $T$  errechnet.

$$p = e^{-\Delta Fitness / T} \quad (5.18)$$

$$\Delta Fitness = |fit(C) - fit(N)| \quad (5.19)$$

Die Folge der Temperaturwerte, also die Verringerung der Temperatur mit jedem Iterationsschritt wird auch Kühlt-schema genannt. Das verwendete geometrische Schema berechnet den Temperaturwert der nächsten Iteration  $T(n+1)$  durch Multiplikation der aktuellen Temperatur  $T(n)$  mit einem festen Faktor  $\alpha$ . Um eine Abkühlung zu erzielen, muss  $\alpha$  kleiner 1 gewählt werden.

$$T(n+1) = \alpha \cdot T(n) \quad (5.20)$$

Mit fallender Temperatur sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Nachbar mit geringerer Fitness übernommen wird, wodurch sich das Verhalten dem im nächsten Abschnitt beschriebenen Hillclimbing annähert. Wie der GA liefert auch der SimA das insgesamt beste Ergebnis zurück.

#### 5.2.5. Hillclimbing

Das Hillclimbing-Verfahren (HC) erlaubt im Gegensatz zum SimA keine Verschlechterung der gefundenen Lösung. Sofern die Fitness eines besuchten Nachbarn schlechter ist,

---

**Algorithmus 2** Simulated Annealing Algorithmus [87]

---

```
// starte mit einem zufällig erzeugten Individuum
Individual CurrentIndividual = createInitialIndividual();
Individual BestIndividual = CurrentIndividual;
double Fitness = calcFitness(CurrentIndividual);
double BestFitness = Fitness;
// setze die initiale Temperatur
double Temperature = setInitialTemperature();

// jeder Schleifendurchlauf besucht einen Nachbarn
for (int m = 0; m < NO_OF_ITERATIONS; m++) {
    // suche zufälligen Nachbar und berechne Fitness
    Individual Neighbor = createNeighbor(CurrentIndividual);
    double NeighborFitness = calcFitness(Neighbor);

    // insgesamt bestes Ergebnis bisher: übernehmen
    if (NeighborFitness >= BestFitness) {
        BestIndividual = Neighbor;
        BestFitness = NeighborFitness;
    }

    // wenn Fitness des Nachbarn besser oder gleich gut ist:
    // Wechsel zu Nachbarn
    if (NeighborFitness >= Fitness) {
        CurrentIndividual = Neighbor;
        Fitness = NeighborFitness;
    } else {
        // wenn Nachbar schlechter ist:
        // wechsele zu Nachbar mit einer Wahrscheinlichkeit von
        //  $\exp(-\Delta\text{Fitness}/\text{Temperature})$ 
        double DeltaFitness = Fitness - NeighborFitness;
        double Probability =  $\exp(-\Delta\text{Fitness}/\text{Temperature})$ ;
        if (getUniformRandomNumber() <= Probability) {
            CurrentIndividual = Neighbor;
            Fitness = NeighborFitness;
        }
    }
}

// aktualisiere Temperatur für nächste Iteration (Kühlschema)
Temperature = updateTemperature();
}

// BestIndividual enthält das Ergebnis des Algorithmus
return BestIndividual;
```

---

---

**Algorithmus 3** Hillclimbing Algorithmus
 

---

```

// starte mit einem zufällig erzeugten Individuum
Individual BestIndividual = createInitialIndividual();
double BestFitness = calcFitness(BestIndividual);

// jeder Schleifendurchlauf besucht einen Nachbarn
for (int m = 0; m < NO_OF_ITERATIONS; m++) {
    // suche zufälligen Nachbar und berechne Fitness
    Individual Neighbor = createNeighbor(BestIndividual);
    double NeighborFitness = calcFitness(Neighbor);

    // besseres Ergebnis bisher: neues bestes Ergebnis
    if (NeighborFitness >= BestFitness) {
        BestIndividual = Neighbor;
        BestFitness = NeighborFitness;
    }
}

// BestIndividual enthält das Ergebnis des Algorithmus
return BestIndividual;

```

---

wird dieser verworfen und in der nächsten Iteration wird eine neuer, zufällig ermittelter Nachbar evaluiert.

Das Programmlisting 3 fasst den Algorithmus zusammen.

### 5.2.6. Earliest Deadline First Heuristik

Die Earliest Deadline First Heuristik (EDF) sortiert die zu versendenden Datenobjekte aufsteigend nach den spätesten Zustellzeitpunkten (Deadlines). Als zweites Sortierkriterium wird die Priorität der Datenobjekte verwendet. Dieses zweite Kriterium findet bei identischen Deadlines Anwendung. Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Heuristiken bezieht EDF die Bewertung der gefundenen Lösung nicht ein, die in Abschnitt 5.2 vorgestellte Ziel- bzw. Fitnessfunktion findet keine Anwendung bei der Ermittlung der Sendereihenfolge. Daher wird dieser Algorithmus während der im nächsten Kapitel beschriebenen Evaluation als Referenz verwendet.

### 5.2.7. Konfiguration der Algorithmen

Die Konfigurationen der Algorithmen GA, SimA und HC müssen speziell für das vorliegende Optimierungsproblem gefunden werden. Die in der Literatur gegebenen Empfehlungen müssen zunächst evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden.

Zur Ermittlung geeigneter Konfigurationen wurden in Vorgriff auf Abschnitt 6.1 ausgesuchte Szenarien mit 8, 10 und 12 Datenobjekten verwendet. Diese Szenarien zeichnen sich dadurch aus, dass beste und schlechteste Lösung nach Gleichung 5.14 möglichst weit auseinander liegen und damit ausreichend Potenzial für die Bewertung der Konfigurationen bieten. Das selbstgesteckte Ziel bei der Konfiguration der Algorithmen liegt darin,

Parameter	Wert
Anzahl Iterationen	$20 \cdot \text{Size}(C)$
Starttemperatur	$5 \cdot \text{Size}(C)$
Temperaturfaktor ( $\alpha$ )	0,9 [81]

Tabelle 5.3.: Konfiguration von Simulated Annealing- und Hillclimbing-Algorithmus

Parameter	Wert
Populationsgröße	$5 \cdot \text{Size}(C)$
Anzahl Generationen	4
Turnierselektion: Turniergröße	$0,2 \cdot \text{Size}(C)$
Mutationswahrscheinlichkeit	$\frac{1}{\text{Size}(C)}$ [81]

Tabelle 5.4.: Konfiguration des genetischen Algorithmus

dass mindestens 90 % aller gefundenen Lösungen in den oberen 10 % des ermittelten Fitnessbereichs (zwischen schlechtester und bester Lösung) liegen. Hierbei wurden pro Paar aus Szenario und Konfiguration jeweils 500 Lösungen errechnet. Die Optimierung der Konfigurationen erfolgte empirisch.

Im ersten Schritt wurden SimA- und HC-Algorithmus konfiguriert. Der im Folgenden verwendete Wert  $\text{Size}(C)$  bezeichnet die Größe eines Chromosoms, also bezogen auf das Optimierungsproblem die Anzahl der zu versendenden Datenobjekte. Sofern ein Parameter aus einer anderen Arbeit übernommen wurde, ist der entsprechende Verweis dem Wert beigelegt. Tabelle 5.3 fasst die Konfiguration von SimA und HC zusammen, wobei der HC lediglich den Parameter „Anzahl Iterationen“ benötigt.

Im zweiten Schritt wurde die Konfiguration des GA ermittelt. Um die Algorithmen GA, SimA und HC bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit vergleichen zu können, dürfen während eines Durchlaufs ebenfalls nur  $20 \cdot \text{Size}(C)$  mögliche Lösungen evaluiert werden. Im Falle des GA ergibt sich die Anzahl evaluierter Lösungen als Produkt der Populationsgröße mit der Anzahl betrachteter Generationen. Tabelle 5.4 zeigt die resultierende Konfiguration.

Die Leistungsfähigkeit der Algorithmen bzgl. des selbstgesteckten Ziels sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass SimA und HC bei den verwendeten Test-szenarien dem GA überlegen sind. Besonders auffällig ist diese Überlegenheit bei einer Chromosomengröße von 12. In diesem Fall findet der GA in nur 47,2% der Durchläufe Lösungen, die in den oberen 10% des Fitnessbereichs liegen. Sobald dieser Bereich aber auf 15% erweitert wird, wird das gewünschte Kriterium mit einem Anteil von 93,8% wieder erfüllt. Vorgreifend auf die Evaluationsergebnisse in Kapitel 6 deutet sich an, dass die Algorithmen SimA und HC, obwohl die softwareseitige Umsetzung weniger komplex ist, bessere Ergebnisse im Vergleich zum GA liefern.

Anteil Lösungen in Top 10% (%)			
<i>Size(C)</i>	SimA	HC	GA
8	100	100	99
10	100	99,8	99,2
12	94,4	97,4	47,2

Tabelle 5.5.: Leistungsfähigkeit der Algorithmen bei den Testszenarien

### 5.3. Zusammenfassung

Im Rahmen der optimierten Übertragung von Daten an Fahrzeuge über HSDPA soll unter Beachtung individueller Deadlines eine Maximierung der Kanalausnutzung erreicht werden. Die Maximierung der Kanalausnutzung bedeutet einen schonenden Umgang mit den Ressourcen des Mobilfunkkanals, da bei einer hohen Kanalausnutzung weniger Transportblöcke bzw. Zeitscheiben des Highspeed-Kanals HS-PDSCH zur Übertragung eines Datenobjekts benötigt werden.

Für die Berechnung einer optimalen Sendereihenfolge der Datenobjekte wird ein Modell benötigt, mit dem die Übertragungsdauer sowie die resultierende Kanalausnutzung geschätzt werden können. Hierzu wurde ein kennlinienbasierter Ansatz vorgeschlagen, der auf Basis des CQI-Verlaufs sowie der Anzahl gleichzeitig aktiver UE durch abschnittsweise Integration bzw. Aufsummierung die gewünschten Werte berechnet. Es wurden Regeln vorgestellt, die die Überlappungseigenschaften aufeinander folgender Datenobjekte festlegen. Diese Regeln sollen sicherstellen, dass sich aus Sicht des Mobilfunknetzes ein konstanter Datenstrom ergibt, der den Bedingungen während der in Kapitel 3 beschriebenen Aufzeichnung der Messdaten entspricht. Andernfalls müsste in Frage gestellt werden, ob das in Kapitel 4 vorgestellte, aus diesen Messdaten abgeleitete Netzlastmodell, angewendet werden darf.

Im zweiten Teil des Kapitels wurde das Optimierungsproblem formuliert, und es wurden drei Verfahren zur Lösung des Problems beschrieben. Bei diesen Verfahren handelt es sich um einen genetischen Algorithmus sowie die Heuristiken Simulated Annealing und Hillclimbing, deren Umsetzungen detailliert beschrieben wurden. Den Abschluss bildete die Angabe der verwendeten Konfigurationen.

Die Evaluation anhand realitätsnaher Szenarien ist Teil des nächsten Kapitels.



# 6 Evaluation

In diesem Kapitel soll das vorgestellte Verfahren zur Optimierung der Datenübertragung an Fahrzeuge per HSDPA detailliert evaluiert werden. Hierzu werden zunächst die verwendeten Szenarien vorgestellt, anhand derer verschiedene realitätsnahe Situationen untersucht werden.

Als erster Schritt bei der Auswertung der Simulationsergebnisse wird das in Kapitel 5 vorgestellte Modell zur Berechnung von Übertragungsdauer sowie Kanalausnutzung via TCP/IP bewertet. Danach folgt der Vergleich der vorgeschlagenen Optimierungsalgorithmen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, also der erreichten Verbesserung der Kanalausnutzung unter Beachtung individueller Deadlines. Als Referenz dienen die Ergebnisse der EDF-Heuristik. Es werden Trends identifiziert und auffällige Beobachtungen diskutiert.

## 6.1. Szenarien

Zur Evaluation der in Kapitel 5 vorgestellten Algorithmen und Verfahren zur optimierten Datenübertragung wurden insgesamt 768 unterschiedliche Szenarien betrachtet. Dieses Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich

- des geografischen Orts sowie der einbezogenen Strecke
- des betrachteten Anwendungsfalls
- des verwendeten CQI-Vorhersagemodells
- der Anzahl gleichzeitig aktiver UE sowie
- der Aktivierung von Zellwechseln

Die geografische Lage der Szenarien ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Insgesamt wurden sieben entlang der Teststrecken liegende Bereiche einbezogen. Diese Bereiche liegen in ländlichen Gebieten (Bereiche 1 bis 3), entlang Autobahnen (Bereiche 4 und 5) sowie in innerstädtischen Gebieten (Bereiche 6 und 7). Während die Bereiche 1-5 Teil der Strecke 1 sind, bezieht sich Bereich 6 nur auf Strecke 2. Für Bereich 7 wurden zwei Konfigurationen untersucht, eine nur unter Einbeziehung von Strecke 1 sowie eine gemischte Konfiguration, bestehend aus Fahrzeugen auf Strecke 1 sowie auf Strecke 2. Insgesamt wurden acht unterschiedliche Kombinationen betrachtet.

Wie bereits in Abschnitt 4.1.2.1 erwähnt stehen für die Simulation acht Datensätze von Strecke 1 sowie 12 Datensätze von Strecke 2 exklusiv zur Verfügung. Diese Datensätze sind nicht Teil der CQI-Karte. Diese Randbedingung begrenzt die Anzahl der im Rahmen eines Simulationslaufs teilnehmenden Fahrzeuge entsprechend.

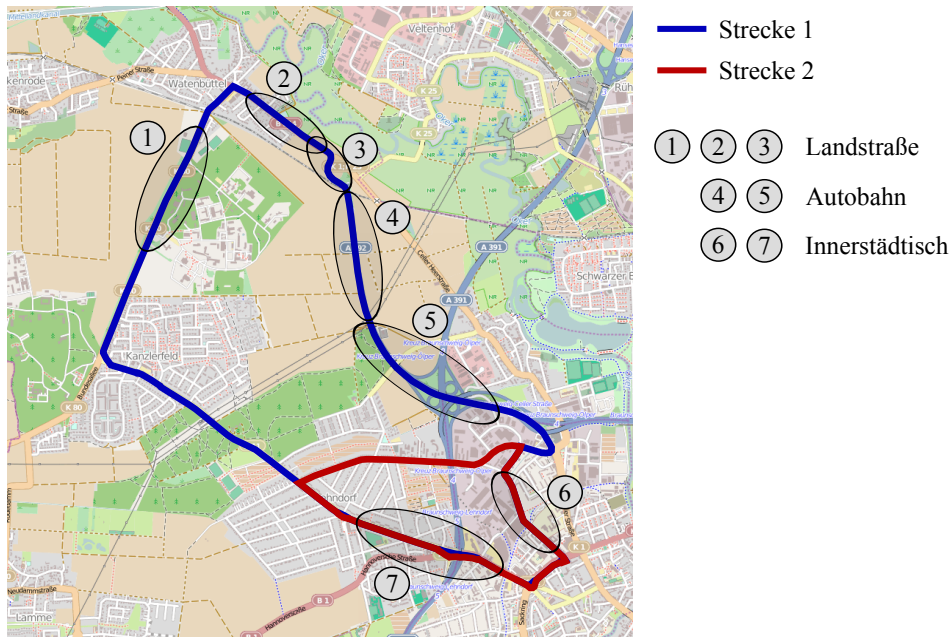


Abbildung 6.1.: Örtliche Lage der betrachteten Szenarien

Pro Kombination aus geografischem Ort und einbezogener Strecke wurden vier unterschiedliche Anwendungsfälle betrachtet. Innerhalb dieser Anwendungsfälle wurden Datenobjekte unterschiedlicher Größen und Prioritäten definiert, die den beteiligten Fahrzeugen zu unterschiedlichen Deadlines zugestellt werden müssen. Analog zur Anzahl verfügbarer Datensätze beträgt die Anzahl an Datenobjekten je Szenario ebenfalls acht bzw. 12. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Szenarien werden auch bei der gemischten Kombination im geografischen Bereich 7, an der 20 Fahrzeuge beteiligt sind, lediglich 12 Datenobjekte versendet. Die verwendeten Größen, Prioritäten und Deadlines basieren auf realistischen Anwendungen, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

Beim Anwendungsfall „Google Earth Navigation“ wird das Nachladen von Google Earth Kartendaten bzw. Satellitenbildern betrachtet. Eine Testfahrt mit einem Seriensystem der Volkswagen AG hat ergeben, dass bei einer Fahrt durch ein Gebiet, für das noch keine Daten im lokalen Cache vorhanden sind, ca. 8 MiB Daten pro 10 km benötigt werden. Bei der Annahme, dass die Daten stückweise heruntergeladen werden, ergibt sich ein mittleres Datenaufkommen von 205 KiB je 250 m gefahrene Strecke.

Der Anwendungsfall „Kartenaktualisierung“ betrachtet die Aktualisierung von lokalem, auf dem Fahrzeug befindlichen Kartenmaterial. Diese Aktualisierung kann beispielsweise neue Informationen zu einem Baustellenverlauf enthalten, die von einem Fahrerassistenzsystem wie einem Baustellenassistenten benötigt werden. Das bereits in Abschnitt 3.2.2 betrachtete NDS-Kartenformat verwendet intern ein Kachelschema, das die Daten geografisch aufteilt. Im Rahmen der Kartenaktualisierung werden eine oder mehrere dieser Kacheln aktualisiert. Exemplarisch wurde ein Kartenbereich in einer deutschen Großstadt betrachtet, die zu übertragene Datenmenge beträgt 282 KiB.

Im Anwendungsfall „Multimedia“ wird ein Mix aus unterschiedlichen Multimediadaten betrachtet, die zum Fahrzeug übertragen werden. Bei der Audioübertragung („Musikstreaming“) wird entsprechend der Arbeit von [49] eine 5 MiB große Musikdatei im mp3-Format betrachtet, die in 25 Stücken, den sogenannten Chunks, zum Fahrzeug übertragen wird. Ein Chunk hat damit eine Größe von 205 KiB. Bei einer Abspieldauer von 5 min beträgt die Dauer eines Chunks 12 s.

Die Übertragung von Videodateien, die z.B. im Rahmen des Rear Seat-Entertainments Anwendung findet, verwendet das in [88] spezifizierte *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* (DASH bzw. MPEG-DASH), das ähnlich der Audioübertragung eine Videodatei in Dateisegmente zerlegt. In der Arbeit von [89] wird ein umfangreicher Testdatensatz angeboten, der MPEG-DASH-Segmente verschiedener Filme in unterschiedlichen Bildschirmauflösungen und Qualitäten (Bitraten) anbietet. Aus diesem Testdatensatz wurde ein exemplarisches Segment mit einer Größe von 334 KiB ausgewählt. Dieses Segment stammt aus dem Film „Big Buck Bunny“ mit einer Bildschirmauflösung von 480x360 Pixel und einer Bitrate von 500 kbit/s. Die Dauer des Segments beträgt 10 s.

Das letzte Datenobjekt des Anwendungsfalls „Multimedia“ ist das Nachladen von Inhalten einer mobilen Anwendung, z.B. zum Anzeigen von Nachrichten oder Wetterberichten. Als Beispielanwendung diente die Android-Applikation „BBC News“. Das Neuladen der Startseite verursachte ein Datenaufkommen von 399 KiB.

Der Anwendungsfall „Mixed“ mischt Datenobjekte der anderen Anwendungsfälle und ergänzt zudem den Empfang von E-Mails. Aus dem Postfach des Autors wurden zwei exemplarische Nachrichten ausgewählt, die eine Sprachnachricht bzw. ein Bild als Anhang enthalten. Die Größen betragen 401 KiB sowie 312 KiB.

Mit Ausnahme des Nachladens der Daten einer mobilen Anwendung, über dessen intern verwendete Datenformate keine Details bekannt sind, handelt es sich bei allen Objekten um komprimierte Daten. Die Durchführung einer weiteren Datenkompression vor dem Versenden führt gegebenenfalls zu einer geringfügigen Reduktion der Objektgrößen, die wegen der geringen Bedeutung auf das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Problem nicht weiter diskutiert werden soll.

Tabelle 6.1 fasst die bei den jeweiligen Anwendungsfällen verwendeten Datenobjekte zusammen. Die Vergabe der Prioritäten erfolgt anhand der in Abschnitt 5.2.1 gemachten Definitionen. Die Datenobjekte der „Kartenaktualisierung“ werden im vorliegenden Beispiel von einem Fahrerassistenzsystem benötigt, das im Fall zu spät zugestellter Daten nicht oder nur eingeschränkt funktioniert. Daher erfolgt die Vergabe von Prioritätsstufe 1. Bei den Daten der Anwendungsfälle „Multimedia“ und „Google Earth Navigation“ handelt es sich um Daten, die keinen direkten Einfluss auf die Fahrzeugführung und damit die Sicherheit der Insassen haben. Eine zu späte Zustellung führt schlimmstenfalls zu einem Komfortverlust bei den Nutzern, weswegen die Prioritätsstufe 2 vergeben wurde. Die E-Mail-Datenobjekte erhalten eine Priorität von 3, da eine verspätete Zustellung im Allgemeinen keinen Einfluss auf die Qualitätswahrnehmung der Nutzer hat.

Anwendungsfall	Datenobjekt	Größe (KiB)	Priorität
Google Earth Navigation	Nachladen Satellitenbilder	205	2
Kartenaktualisierung	Aktualisierung von Kacheln	282	1
Multimedia	Audiostreaming (Chunk)	205	2
Multimedia	Videostreaming (Segment)	334	2
Multimedia	Nachladen Anwendung	399	2
Mixed	E-Mail mit Sprachnachricht	401	3
Mixed	E-Mail mit Bild	312	3

Tabelle 6.1.: Verwendete Datenobjekte mit Größe und Priorität

Jedes Szenario wurde unter Verwendung der in Abschnitt 5.1.4 vorgestellten drei Modelle zur Prädiktion der CQI-Werte der beteiligten UE („vollständiges Wissen“, „CQIMap“ und „aktueller CQI“) simuliert. Als weiterer Parameter wurde die Anzahl gleichzeitig aktiver UE variiert. Es wurden Berechnungen mit einer festen Anzahl von UE (0, 1 sowie 2 UE) sowie dem in Abschnitt 4.2 vorgestellten Netzlastmodell durchgeführt.

Als letzter Simulationsparameter kann die Durchführung von Zellwechseln aktiviert bzw. deaktiviert werden. Sofern Zellwechsel aktiviert sind, führen die UE analog zu den aufgezeichneten Datensätzen Zellwechsel durch. Falls Zellwechsel deaktiviert sind, befinden sich alle an der Simulation beteiligten UE in der selben Zelle.

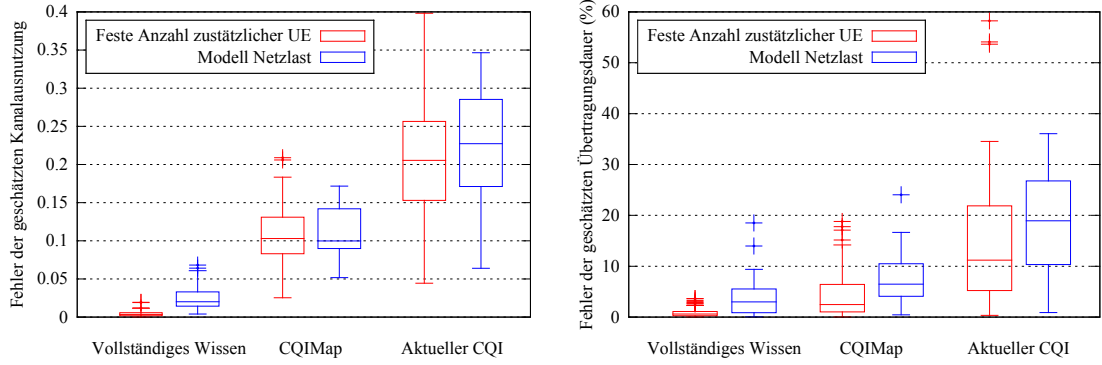
## 6.2. Ergebnisse

Die folgende Diskussion der Ergebnisse gliedert sich in zwei Teile. Zunächst wird eine Bewertung der Güte des in Kapitel 5 vorgestellten Modells zur Schätzung von Kanalausnutzung und Übertragungsdauer durchgeführt. Anschließend erfolgt ein Vergleich der vorgeschlagenen Optimierungsverfahren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, also der erreichten Verbesserung der Kanalausnutzung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der spätesten Zustellzeitpunkte der Datenobjekte. Als Referenz dient die EDF-Heuristik, die lediglich eine Sortierung der Daten vornimmt, die Bewertung einer Lösung aber nicht mit einbezieht.

### 6.2.1. Bewertung des Datenübertragungsmodells

Zur Bewertung der Schätzungen des in Kapitel 5 vorgestellten Datenübertragungsmodells werden die Simulationsergebnisse der EDF-Heuristik verwendet. Diese Heuristik nimmt keine Änderung der Sendereihenfolge während der Datenübertragung vor, so dass ein Vergleich der ersten Schätzergebnisse mit den tatsächlichen Werten erfolgen kann.

Der Vergleich der Kanalausnutzung findet auf Objektebene durch Vergleich der geschätzten und der tatsächlichen Werte statt. Nach Gleichung 6.1 wird der Schätzfehler  $E_u$  berechnet, indem der Betrag der Differenz aus geschätzter Kanalausnutzung  $u_{i,est}$  und gemessener Kanalausnutzung  $u_{i,real}$  multipliziert mit der Datenobjektgröße  $Size_i$  aufsummiert und abschließend durch die Gesamtgröße aller Datenobjekte  $Size_{complete}$  dividiert



(a) Absoluter Fehler der geschätzten Kanalausnutzung (b) Absoluter Fehler der geschätzten Gesamtübertragungsdauer

Abbildung 6.2.: Fehler des Datenübertragungsmodells bei der Schätzung von Kanalausnutzung und Übertragungsdauer (EDF-Heuristik, keine Zellwechsel)

wird.

$$E_u = \frac{1}{Size_{complete}} \cdot \sum_{i=1}^n |u_{i,real} - u_{i,est}| \cdot Size_i \quad (6.1)$$

Der Fehler der Übertragungsdauer  $E_T$  wird durch Vergleich der geschätzten sowie der tatsächlichen Gesamtübertragungsdauer ( $T_{est}$  sowie  $T_{real}$ ) berechnet. Im Gegensatz zu  $E_u$  gibt  $E_T$  einen Eindruck darüber, wie auf Szenarioebene geschätzt wurde. Als Bezugsgröße dient nach Gleichung 6.2 die tatsächliche Übertragungsdauer.

$$E_T = \frac{|T_{real} - T_{est}|}{T_{real}} \quad (6.2)$$

Abbildung 6.2 zeigt die Fehler der beiden Kerngrößen Kanalausnutzung und Übertragungsdauer unter Verwendung einer festen Anzahl zusätzlicher UE sowie unter Verwendung des in Abschnitt 4.2 vorgestellten Netzlastmodells. Als CQI-Vorhersagemodelle dienen „vollständiges Wissen“, Verwendung der CQI-Karte sowie die Verwendung des aktuell bekannten CQI, Zellwechsel sind deaktiviert. Tabelle 6.2 fasst die Durchschnittswerte zusammen.

Die Güte des Datenübertragungsmodells kann am besten für das CQI-Vorhersagemodell „vollständiges Wissen“ unter Verwendung einer festen Anzahl zusätzlicher UE beurteilt werden. In diesem Fall sind die beiden Parameter bekannt, die nach Abschnitt 5.1.2 für die Berechnung von Übertragungsdauer und Kanalausnutzung benötigt werden. Sowohl  $\bar{E}_u$  als auch  $\bar{E}_T$  sind mit Werten von 0,004 bzw. 0,9 % gering und illustrieren damit die Güte des erstellten Modells.

Mit steigenden Unsicherheiten bei der Vorhersage des CQI sowie der Anzahl zusätzlich aktiver UE nimmt die Güte des erstellten Modells erwartungsgemäß ab und erreicht bei Verwendung des aktuellen CQI in Verbindung mit dem Netzlastmodell das Minimum.

CQI-Vorhersagemodell	zusätzliche UE	$\bar{E}_u$	$\bar{E}_T$ (%)
vollst. Wissen	feste Anzahl UE	0,004	0,9
	Modell Netzlast	0,026	5,2
CQIMap	feste Anzahl UE	0,109	4,2
	Modell Netzlast	0,112	7,6
aktueller CQI	feste Anzahl UE	0,208	14,7
	Modell Netzlast	0,228	19,0

Tabelle 6.2.: Durchschnittliche Fehler der Kanalausnutzung und der Übertragungsdauer (EDF-Heuristik, keine Zellwechsel)

Zusätzlich nimmt in Abhängigkeit des CQI-Vorhersagemodells die Streuung der Ergebnisse zu. Dies kann damit erklärt werden, dass die Vorhersagemodelle CQIMap und „aktueller CQI“ szenarioabhängig unterschiedlich gute Vorhersagen abgeben.

Es ist zu erkennen, dass  $\bar{E}_u$  und  $\bar{E}_T$  in keinem linearen Zusammenhang stehen. Dies liegt zum einen an der in Abschnitt 4.2.2.1 diskutierten Degradierung beim Scheduling für niedrige CQI-Werte, zum anderen können sich objektindividuelle Fehleinschätzungen der Kanalausnutzung bei der Berechnung der Gesamtübertragungsdauer gegenseitig verstärken oder abschwächen.

### 6.2.2. Vergleich der Optimierungsstrategien

Im Folgenden werden die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Optimierungsstrategien für die unterschiedlichen Konfigurationen, also verschiedene Kombinationen aus Anzahl zusätzlicher UE, des verwendeten CQI-Vorhersagemodells sowie die Aktivierung bzw. Deaktivierung von Zellwechseln, verglichen. Als Referenzstrategie wird die EDF-Heuristik verwendet. Folgende Kriterien werden für die Bewertung der Szenarien verwendet, wobei es sich nicht um die geschätzten, sondern um die während der Simulation erreichten Ergebnisse handelt:

#### 1. Verbesserung der Kanalausnutzung

Die Verbesserung der Kanalausnutzung  $\Delta u_{rel}$  berechnet sich nach Gleichung 6.3 als normierte Differenz der Kanalausnutzung der zu bewertenden Strategie  $u_{Strategy}$  und der Kanalausnutzung der EDF-Heuristik  $u_{EDF}$ .

$$\Delta u_{rel} = \frac{u_{Strategy} - u_{EDF}}{u_{EDF}} \quad (6.3)$$

Die Kanalausnutzung  $u$  wird dabei gewichtet über die einzelnen Objekte berechnet:

$$u = \frac{1}{Size_{complete}} \cdot \sum_{i=1}^n u_i \cdot Size_i \quad (6.4)$$

		mittlere Verbesserung $\overline{\Delta u_{rel}}$ (%)					
		ohne Zellwechsel			mit Zellwechsel		
CQI-Vorhersagemodell	zusätzliche UE	SimA	HC	GA	SimA	HC	GA
vollst. Wissen	feste Anzahl UE	30,1	30,1	29,4	11,7	11,7	11,5
	Modell Netzlast	38,1	38,2	37,7	11,3	11,5	11,5
CQIMap	feste Anzahl UE	20,9	21,5	20,9	6,9	6,8	6,3
	Modell Netzlast	27,0	26,5	26,6	7,4	7,1	6,5
aktueller CQI	feste Anzahl UE	13,1	14,1	8,3	4,0	4,5	0,6
	Modell Netzlast	20,3	20,7	11,8	4,1	4,0	0,9

Tabelle 6.3.: Mittlere Verbesserung Kanalausnutzung (bezogen auf EDF-Heuristik)

## 2. Verringerung der Übertragungsdauer

Die Verringerung der Übertragungsdauer  $\Delta T_{rel}$  ergibt sich analog als normierte Differenz der Übertragungsdauern der EDF-Heuristik  $T_{EDF}$  und der zu bewertenden Strategie  $T_{Strategy}$  (siehe Gleichung 6.5)

$$\Delta T_{rel} = \frac{T_{EDF} - T_{Strategy}}{T_{EDF}} \quad (6.5)$$

## 3. Zu spät zugestellte Datenobjekte

Bei der Bewertung der zu spät zugestellten Datenobjekte werden analog zu der in Abschnitt 5.2 vorgestellten Fitnessfunktion die prioritätsabhängigen Strafwerte  $pen_i$  verwendet. Diese in Gleichung 5.16 definierten Strafwerte werden für alle  $n$  Datenobjekte des Szenarios aufsummiert und bilden den sogenannten *DelayScore*.

$$DelayScore = \sum_{i=1}^n pen_i \quad (6.6)$$

Die Ergebnisse des Vergleichs sind in den folgenden Tabellen und Abbildungen dargestellt. Die Abbildungen 6.3 und 6.4 enthalten die nach Gleichung 6.3 bzw. 6.5 errechneten Verbesserungen der Kanalausnutzung sowie Verkürzungen der Gesamtübertragungszeit, dargestellt als Boxplots<sup>1</sup>. Die resultierenden Mittelwerte  $\overline{\Delta u_{rel}}$  und  $\overline{\Delta T_{rel}}$  sind in den Tabellen 6.3 sowie 6.4 aufgeführt. Abbildung 6.5 sowie die Tabellen 6.5 und 6.6 enthalten die Summen der als Maß für zu spät zugestellte Datenobjekte verwendeten DelayScores der einzelnen zugrunde liegenden Szenarien.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse analysiert, und es werden die wesentlichen Trends wie auch auffällige Beobachtungen diskutiert:

<sup>1</sup>Die Box enthält die Werte vom ersten bis zum dritten Quartil, der horizontale Strich markiert den Median. Die Antennen (Whisker) markieren die Werte, die innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands am weitesten entfernt liegen. Ausreißer werden als Kreuze gekennzeichnet.

CQI-Vorhersagemodell	zusätzliche UE	mittlere Verkürzung $\overline{\Delta T_{rel}}$ (%)					
		ohne Zellwechsel			mit Zellwechsel		
		SimA	HC	GA	SimA	HC	GA
vollst. Wissen	feste Anzahl UE	20,2	19,9	19,6	9,6	9,5	10,5
	Modell Netzlast	25,0	25,4	24,1	10,2	10,4	11,0
CQIMap	feste Anzahl UE	13,0	13,3	13,1	4,6	4,5	5,7
	Modell Netzlast	15,1	15,5	15,9	1,3	2,7	4,4
aktueller CQI	feste Anzahl UE	8,8	9,3	6,5	-0,9	-0,5	-1,1
	Modell Netzlast	11,5	10,5	3,8	-3,0	-4,2	-1,5

Tabelle 6.4.: Mittlere Verkürzung der Gesamtübertragungsdauer (bezogen auf EDF-Heuristik)

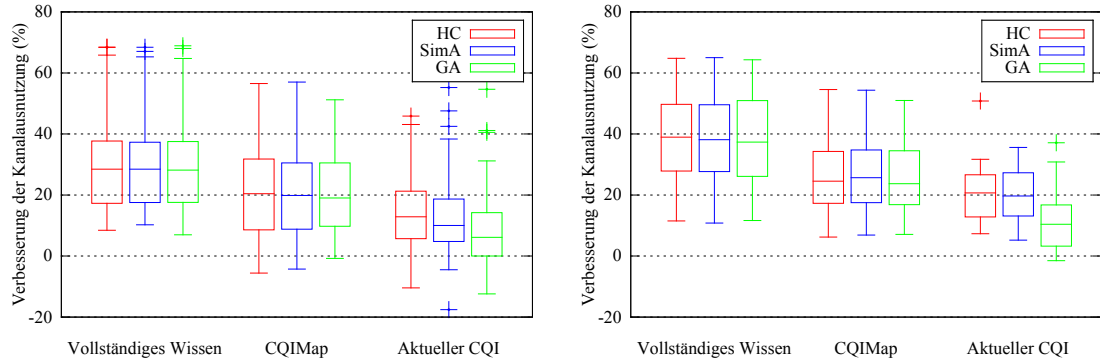
CQI-Vorhersagemodell	zusätzliche UE	Summe DelayScores			
		EDF	SimA	HC	GA
vollst. Wissen	feste Anzahl UE	154,5	23	20,5	15
	Modell Netzlast	45,9	9,1	4,1	8,5
CQIMap	feste Anzahl UE	128,5	35	26,5	41,5
	Modell Netzlast	21,8	14,5	11,2	11,1
aktueller CQI	feste Anzahl UE	165,5	82	62	68,5
	Modell Netzlast	45,9	16,7	17,6	26,7

Tabelle 6.5.: Verspätet empfangene Datenobjekte, angegeben als Summe der DelayScores, ohne Zellwechsel

CQI-Vorhersagemodell	zusätzliche UE	Summe DelayScores			
		EDF	SimA	HC	GA
vollst. Wissen	feste Anzahl UE	17	2,5	4,5	2
	Modell Netzlast	1,2	2,6	1,4	0,8
CQIMap	feste Anzahl UE	15	8,5	8,5	8,5
	Modell Netzlast	1	4,1	1,6	2,9
aktueller CQI	feste Anzahl UE	16	10	7	10,5
	Modell Netzlast	1	3,7	2,7	4

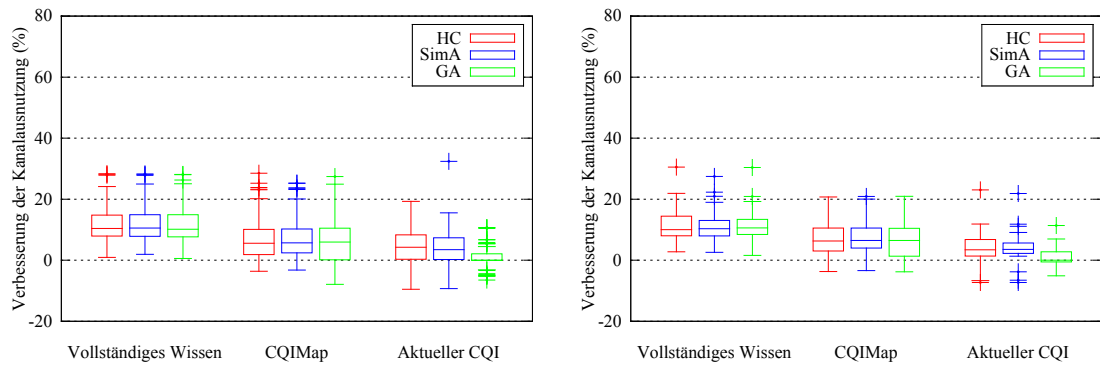
Tabelle 6.6.: Verspätet empfangene Datenobjekte, angegeben als Summe der DelayScores, mit Zellwechsel





(a) Konfiguration „feste Anzahl UE“, kein Zellwechsel

(b) Konfiguration „Modell Netzlast“, kein Zellwechsel



(c) Konfiguration „feste Anzahl UE“, mit Zellwechsel

(d) Konfiguration „Modell Netzlast“, mit Zellwechsel

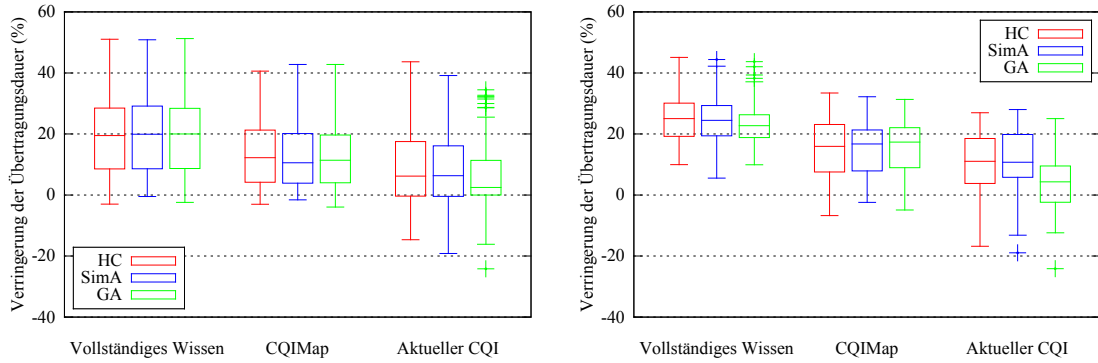
Abbildung 6.3.: Verbesserung der Kanalausnutzung (bezogen auf EDF-Heuristik)

### Beste Ergebnisse bei vollständigem Wissen

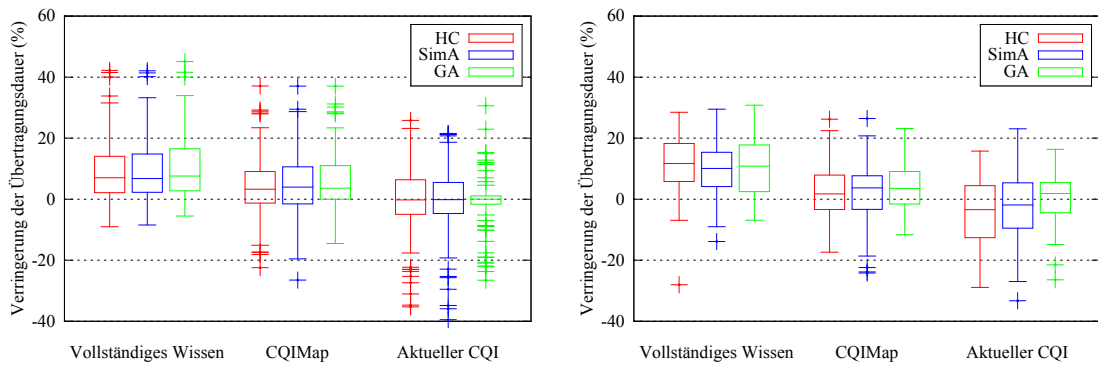
Unabhängig von dem verwendeten Optimierungsverfahren werden die besten Ergebnisse erreicht, wenn vollständiges Wissen über die Randbedingungen vorliegt. Bei den Randbedingungen handelt es sich sowohl um die zu prädizierenden zukünftigen CQI-Werte der Fahrzeuge als auch um das Vorhandensein von Zellwechseln. Bei Verwendung einer „festen Anzahl UE“ wie auch beim „Modell Netzlast“ ist die Leistungsfähigkeit am höchsten, wenn vollständiges Wissen über die zu zukünftigen CQI-Werte vorhanden ist und Zellwechsel deaktiviert sind.

Wie bereits in Abschnitt 6.2.1 bei der Bewertung des Datenübertragungsmodells gezeigt ist in diesem Fall die Berechnung von Kanalausnutzung und Übertragungsdauer am genauesten, so dass sich die besten Voraussetzungen für eine Optimierung ergeben. Bei einzelnen Szenarien können unter Verwendung einer festen Anzahl UE Verbesserungen der Kanalausnutzung von 69 % bzw. Verringerungen der Übertragungsdauer von 51 % erreicht werden.

Die als Maß für die Einhaltung der Deadlines verwendete DelayScore-Summe kann für eine feste Anzahl UE von allen Optimierungsstrategien auf unter 15%, beim Netzlastmo-



(a) Konfiguration „feste Anzahl UE“, kein Zellwechsel (b) Konfiguration „Modell Netzlast“, kein Zellwechsel



(c) Konfiguration „feste Anzahl UE“, mit Zellwechsel (d) Konfiguration „Modell Netzlast“, mit Zellwechsel

Abbildung 6.4.: Verkürzung der Gesamtübertragungsdauer (bezogen auf EDF-Heuristik)

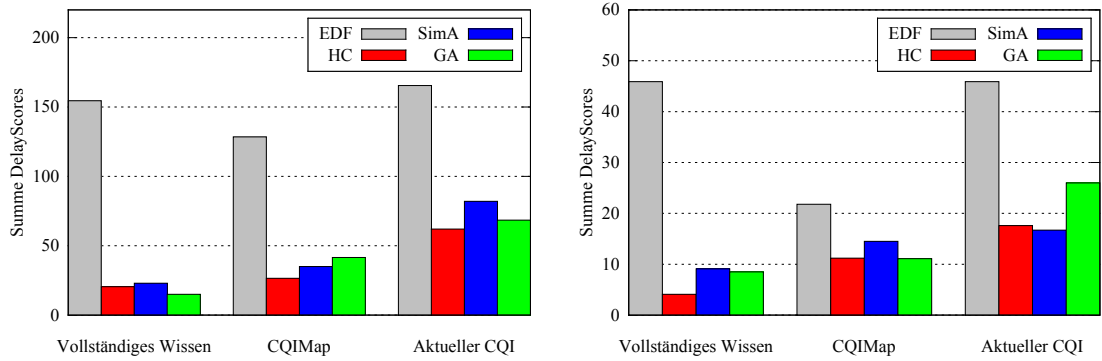
dell auf unter 20% des Wertes der EDF-Heuristik reduziert werden. Die Anzahl zu spät zugestellter Objekte wurde damit signifikant reduziert.

### Abnahme der Optimierungsqualität mit Abnahme des Wissens

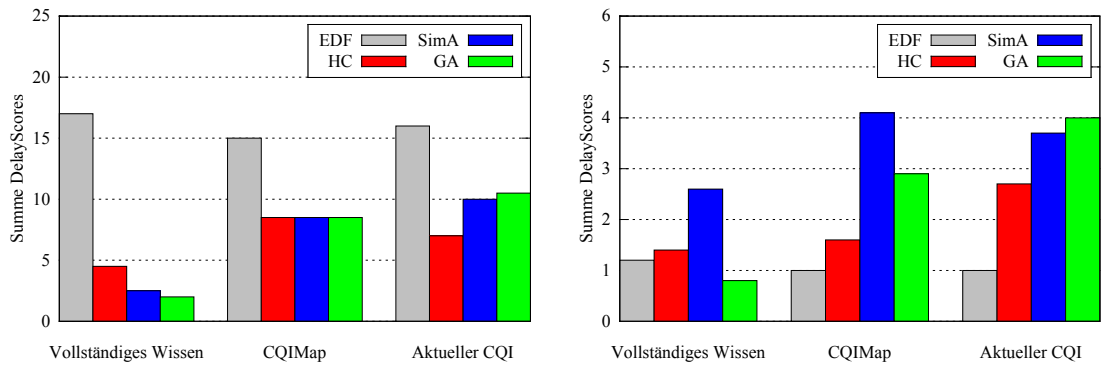
Sobald das Wissen über die zukünftigen CQI-Werte sowie Zellwechsel abnimmt, nimmt auch die Qualität der Optimierungsergebnisse ab. Dieser Trend betrifft die Verbesserung der Kanalausnutzung, die Verkürzung der Übertragungsdauer wie auch die Anzahl verspätet empfangener Datenobjekte (Summe DelayScores).

Der ungünstigste Fall ergibt sich für die Kombination aus CQI-Vorhersagemodell „aktueller CQI“ sowie aktivierten Zellwechsel, wo nur noch eine geringe Verbesserung der Kanalausnutzung erzielt werden kann. Die mittlere Verkürzung der Gesamtübertragungsdauer nimmt sogar negative Werte an, was einer Verschlechterung gegenüber der EDF-Heuristik entspricht. Selbiges gilt für die DelayScore-Summe bei der Verwendung des Netzlastmodells, die für alle Optimierungsstrategien über den Werten der EDF-Heuristik liegt.

Es sei angemerkt, dass sich der Einfluss der Zellwechsel nicht ausschließlich auf die



(a) Konfiguration „feste Anzahl UE“, kein Zellwechsel (b) Konfiguration „Modell Netzlast“, kein Zellwechsel



(c) Konfiguration „feste Anzahl UE“, mit Zellwechsel (d) Konfiguration „Modell Netzlast“, mit Zellwechsel

Abbildung 6.5.: Verspätet empfangene Datenobjekte, angegeben als Summe der DelayScores

Abnahme des Wissens bei der Prädiktion beruht. Das Aktivieren von Zellwechseln führt dazu, dass eigentlich für eine Zelle geplante Szenarien auf mehrere Zellen aufgeteilt werden. Damit stehen für die Datenübertragung mehr Ressourcen des Mobilfunknetzes bereit, wodurch die Szenarien „entschärft“ werden. Dies führt zu einer Verringerung des Optimierungspotentials.

### Ähnliche Leistungsfähigkeit der Optimierungsalgorithmen

Analog zur Bewertung des Datenübertragungsmodells kann die Leistungsfähigkeit der Optimierungsalgorithmen am besten für das CQI-Vorhersagemodell „vollständiges Wissen“ unter Verwendung einer festen Anzahl zusätzlicher UE bei deaktivierten Zellwechseln beurteilt werden. Für diese Konfiguration zeigen die Algorithmen SimA, HC und GA ähnliche Leistungsfähigkeiten, wobei der GA bzgl. der mittleren Verbesserung der Kanalausnutzung sowie der mittleren Verringerung der Übertragungsdauer die schlechtesten Ergebnisse liefert. Im Gegenzug erreicht der GA die niedrigste DelayScore-Summe.

Da SimA und HC deutlich einfacher in Software umzusetzen sind, sollten diese Algorithmen den Vorzug gegenüber dem GA erhalten.

**Beobachtung: Die Summe der DelayScores ist für EDF unter Verwendung des CQI-Vorhersagemodells CQIMap bei Szenarien ohne Zellwechsel geringer**

Die Bestimmung der Sendezeitpunkte der Datenobjekte erfolgt unter Verwendung der Overlapping-Regeln, die in Abschnitt 5.1.3 formuliert wurden und auf den geschätzten Übertragungsdauern der jeweiligen Objekte beruhen. Die Schätzung der Übertragungsdauer berücksichtigt neben dem CQI-abhängigen maximalen Datendurchsatz auch Degradierungseffekte beim Scheduling (siehe Abschnitt 4.2.2.3). Diese Degradierung führt bei niedrigen CQI-Werten und gleichzeitig aktiven UE zu einer entsprechenden Verlängerung der geschätzten Übertragungsdauer. Die Vorhersagemodelle „vollständiges Wissen“ und „aktueller CQI“ verwenden die tatsächlichen CQI der Teilnehmer, das Modell CQIMap hingegen gemittelte Werte. Diese gemittelten Werte können für niedrige CQI etwas höher als die tatsächlichen CQI liegen. Dadurch nimmt das Modell an, dass die Übertragung dieser Objekte früher beendet ist und startet die Übertragung des Folgeobjektes früher, was die Gesamtübertragungszeit verkürzt und damit die Anzahl zu spät empfangener Objekte verringert. Diese Begründung wurde exemplarisch an mehreren Szenarien überprüft.

Die stärkere Ausprägtheit dieser Beobachtung für das „Modell Netzlast“ spiegelt sich auch bei „feste Anzahl UE“ wider, wenn dort die Szenarien mit genau einem zusätzlichen UE betrachtet werden. Die mittlere Anzahl zusätzlicher UE liegt beim „Modell Netzlast“ nach Abschnitt 5.1.5 mit Werten von 0,95 (Strecke 1) bzw. 1,138 (Strecke 2) im Bereich von 1.

**Beobachtung: Der Gewinn der Kanalausnutzung ist bei Verwendung von „Modell Netzlast“ höher als bei „feste Anzahl UE“ (ohne Zellwechsel)**

Diese Beobachtung kann analog zur vorhergehenden Beobachtung durch die im Bereich von 1 liegende mittlere Anzahl gleichzeitig aktiver UE für das „Modell Netzlast“ erklärt werden. Werden für „feste Anzahl UE“ nur die Szenarien mit genau einem aktiven UE betrachtet, ergibt sich ebenfalls ein höherer Gewinn der Kanalausnutzung.

**Beobachtung: Die Summen der Delayscores sind bei Verwendung von „Modell Netzlast“ niedriger als bei „feste Anzahl UE“ (ohne Zellwechsel)**

Bei „feste Anzahl UE“ werden die Szenarien mit 0, 1 und 2 gleichzeitig aktiven UE berechnet, so dass dreimal mehr Szenarien untersucht und damit DelayScores aufsummiert wurden als beim „Modell Netzlast“.

**Beobachtung: Beim CQI-Modell „aktueller CQI“ sind die Verbesserungen von Kanalausnutzung und Übertragungsdauer für den GA schlechter**

Zur Diversifikation der initialen Population wird der initialen Population als erstes Chromosom die Lösung der EDF-Heuristik hinzugefügt. Bei „aktueller CQI“ sind die CQI-Prädiktionen und damit die geschätzten Kanalausnutzungen für die einzelnen Datenobjekte über die Zeit konstant. Daher ist, sofern keine Verzögerungen bei der Schätzung gefunden werden, die Fitness für alle Permutationen gleich. Der GA verwendet als Ver-

gleichsoperator für Fitness-Werte ein „größer“ (so ist es in der verwendeten Software ECJ implementiert), der SA sowie der daraus abgeleitete HC ein „größer gleich“ (so ist es von [87] im Pseudo-Code vorgeschlagen worden). Daher bleibt der GA bei der Evaluierung beim ersten Chromosom der Population, bei dem es sich um die EDF-Lösung handelt, SA und HC hingegen verwenden das zuletzt evaluierte Chromosom. Dieses liefert in der Regel eine bessere Lösung als die Lösung der EDF-Heuristik. Dies zeigt, dass bei fehlendem a priori Wissen und damit fehlender Grundlage für die Anwendung der Optimierungsstrategien Implementierungsdetails des Algorithmus über die Güte der Ergebnisse entscheiden können.

### 6.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst verschiedene realitätsnahe Szenarien erarbeitet, die als Basis für die Evaluation des im vorherigen Kapitel vorgeschlagenen Modells zur Berechnung von Kanalausnutzung und Übertragungsdauer sowie der Verfahren zur Optimierung der Datenübertragung dienen. Die insgesamt 768 Szenarien decken verschiedene geografische Gebiete ab und adressieren unterschiedliche mobilitätsbezogene Anwendungsfälle. Ferner werden drei Methoden zur Vorhersage der CQI-Verläufe der Fahrzeuge verwendet, die von vollständigem Wissen über die in Kapitel 3 vorgestellten CQI-Karte bis zur Verwendung der aktuell von den Fahrzeugen gemeldeten CQI reichen. Die Anzahl zusätzlich aktiver UE ist fest, bzw. es wird der in Kapitel 4 vorgestellte Netzlastgenerator verwendet.

Im ersten Schritt wurde das in Kapitel 5 vorgestellte Modell evaluiert. Hierzu wurden die Schätzergebnisse der Earliest Deadline First Heuristik (EDF), die eine unveränderte Reihenfolge der Datenobjekte garantiert, mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Im Falle des besten a priori Wissens, also unter Verwendung des CQI-Vorhersagemodells „vollständiges Wissen“ sowie einer festen Anzahl zusätzlich aktiver UE, liegen der mittlere Schätzfehler der Kanalausnutzung sowie der Gesamtübertragungsdauer bei 0,004 bzw. 0,9 %. Dies unterstreicht die Güte des vorgestellten Verfahrens.

Anschließend wurden die in Kapitel 6 beschriebenen Optimierungsverfahren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, also des Potenzials zur Verbesserung der Kanalausnutzung bei gleichzeitiger Berücksichtigung individueller Deadlines von Datenobjekten, untersucht. Die EDF-Heuristik, die lediglich eine Sortierung der Datenobjekte vornimmt, dient als Referenz.

Die besten Ergebnisse werden erreicht, wenn vollständiges Wissen über die CQI-Verläufe sowie die Zahl der gleichzeitig aktiver UE vorhanden war. In Einzelfällen können Verbesserungen der Kanalausnutzung von 69 % bzw. Verringerungen der Gesamtübertragungsdauer von 51 % erreicht werden. Die als Maß für die Einhaltung der Deadlines verwendete DelayScore-Summe kann für eine feste Anzahl UE von allen Optimierungsstrategien auf unter 15%, beim Netzlastmodell auf unter 20% des Wertes der EDF-Heuristik reduziert werden. Die Anzahl zu spät zugestellter Objekte wurde damit signifikant reduziert.

Mit abnehmenden Wissen nimmt auch die Qualität der Optimierungsergebnisse ab. Bei Verwendung des zuletzt von den Fahrzeugen gelieferten CQI in Verbindung mit aktivierten Zellwechseln kann nur noch eine geringe Verbesserung der Kanalausnutzung erreicht werden, die mittlere Verkürzung der Gesamtübertragungsdauer nimmt sogar negative Werte an. Selbiges gilt für die DelayScore-Summe bei der Verwendung des Netzlastmodells, die für alle Optimierungsstrategien über den Werten der EDF-Heuristik liegt.

Für den Einsatz des Verfahrens wird daher empfohlen, Maßnahmen zu treffen, um ein möglichst hohes Wissen über die zu erwartenden CQI-Verläufe der Fahrzeuge sowie die Auslastung der Luftschnittstelle durch gleichzeitig aktive UE zu erhalten. Die CQI-Karte sollte regelmäßig durch Einbeziehung neuer Messungen aktuell gehalten werden. Auf diese Weise kann zeitnah auf Anpassungen oder Störungen des Mobilfunknetzes reagiert werden. Um den Einfluss gleichzeitig aktiver UE zu minimieren, wird vorgeschlagen, im Rahmen eines QoS-Vertrages ein festes Ressourcenkontingent mit den jeweiligen Mobilfunkanbietern zu vereinbaren. Trotz weiterer Last steht damit für die Datenübertragung zur Fahrzeugflotte immer ein entsprechender vorher bekannter Teil der Ressourcen der Luftschnittstelle bereit. Die Unsicherheit durch wechselnde Auslastungen des Mobilfunkkanals entfällt.

# 7 Zusammenfassung & Ausblick

Die Zahl der vernetzten Fahrzeuge wächst stetig. Während heutige Systeme den Fokus auf die Bereiche Infotainment, Navigation und Remote-Dienste legen, werden zukünftig sogenannte ADAS-Anwendungen verfügbar sein, die mitunter aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen und damit einen direkten Einfluss auf die Betriebssicherheit haben. Als nächster Evolutionsschritt ist das teil- oder vollautomatische Fahren zu sehen. Diese Systeme haben einen hohen Anspruch bzgl. der Qualität sowie der Aktualität der bereitgestellten Daten.

Heutige Fahrzeuge sind über Mobilfunknetze mit dem Internet verbunden. Mobilfunknetze zeichnen sich auf der einen Seite durch eine hohe geografische Abdeckung aus, auf der anderen Seite ist die Qualität des Datenkanals und damit der erreichbare Datendurchsatz örtlichen Schwankungen unterlegen. Regional können unterschiedliche Ausbauzustände des Netzes vorliegen, so dass unterschiedlich leistungsfähige Mobilfunktechnologien zur Verfügung stehen. Zudem können bezogen auf eine Mobilfunktechnologie unterschiedliche Signalqualitäten die erreichbaren Datendurchsätze beeinflussen. Dies bedeutet, dass sich bewegende vernetzte Fahrzeuge mit stetigen Änderungen der Performanz des mobilen Datenkanals konfrontiert sind.

Diese Änderungen der Performanz haben einen negativen Einfluss auf die mobilen Anwendungen, was von Verzögerungen beim Herunterladen von Daten bis zur völligen Nichtverfügbarkeit der Anwendung reicht. Während fehlende oder verzögerte Datenobjekte im Infotainmentbereich lediglich zu Komforteinbußen führen, können bei Fahrerassistenzsystemen Fehlfunktionen bzw. Funktionsausfälle resultieren, die gefährliche Situationen oder Unfälle herbeiführen. Es ist daher wichtig, die Eigenschaften von Mobilfunkkanälen bei der Konzeption sowie beim Betrieb mobiler Anwendungen zu beachten und so deren Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zu steigern.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit mobiler Anwendungen ist die Verwendung sogenannter Connectivity-Maps. Connectivity-Maps enthalten georeferenzierte Daten zur Qualität bzw. zu Eigenschaften des Mobilfunknetzes, die im Rahmen von Messfahrten empirisch gesammelt und aggregiert wurden. Dieses a priori Wissen kann verwendet werden, um auf die wechselnden Änderungen der Performanz des mobilen Datenkanals proaktiv zu reagieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Verteilung von Datenobjekten von einem zentralen Server an Fahrzeuge optimiert werden kann. Ziel der Optimierung ist es, die Reihenfolge, in der die Daten an die Fahrzeuge verschickt werden, so zu wählen, dass unter Beachtung individueller spätester Zustellzeitpunkte und Prioritäten die Ausnutzung des Mobilfunkkanals maximiert wird. Unter Maximierung der Ausnutzung wird verstanden, dass während des Sendens der Daten eine möglichst hohe

Kanalqualität vorherrscht. In diesem Fall ist die spektrale Effizienz hoch, so dass weniger Ressourcen der Luftschnittstelle benötigt werden.

Die Arbeit fokussiert sich auf den Mobilfunkstandard High Speed Downlink Packet Access (HSDPA). HSDPA verwendet als Maß für die Kanalqualität den sogenannten Channel Quality Indicator (CQI). Der CQI wird zyklisch von den Endgeräten zur Basisstation des HSDPA-Netzes übertragen und legt das zur Datenübertragung zu verwendende Modulations- und Kodierungsverfahren fest. Über vom 3GPP standardisierte Tabellen kann direkt vom CQI auf die maximal erreichbaren Datenraten und damit die Ausnutzung der Luftschnittstelle geschlossen werden.

Über speziell für HSDPA erstellte CQI-Karten wurde der zu erwartende CQI-Verlauf der beteiligten Fahrzeuge prädiziert. Es wurde ein Modell vorgestellt, dass anhand dieser prädizierten CQI-Verläufe Schätzungen der Übertragungsdauer sowie der Ausnutzung der Luftschnittstelle vornimmt. Diese Schätzungen wurden verwendet, um eine optimale Reihenfolge der wartenden Datenobjekte zu finden. Die abschließende Evaluation zeigte die Leistungsfähigkeit des Verfahrens auf. In einer Simulation wurden insgesamt 768 Szenarien untersucht. Unter Idealbedingungen, also vollständigem Wissen über die Randbedingungen, konnten in Einzelfällen Verbesserungen der Kanalausnutzung von 69 % bzw. Verringerungen der Gesamtübertragungsdauer von 51 % erreicht werden. Gleichzeitig wurde die Zahl zu spät zugestellter Datenobjekte signifikant reduziert.

Im Folgenden werden die Forschungsbeiträge dieser Arbeit nochmal hervorgehoben. Danach erfolgt die Diskussion der Übertragbarkeit des Verfahrens auf weiterentwickelte bzw. neue Mobilfunksysteme, namentlich Dual Cell HSPA und LTE. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf mögliche zukünftige Arbeiten.

## 7.1. Forschungsbeiträge

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren vorgestellt, um auf Basis von a priori Wissen über die zu erwartenden Kanalqualitäten eine optimale Sendereihenfolge zu ermitteln und somit die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit mobiler Anwendungen zu erhöhen. Folgende Ergebnisse und Erkenntnisse sollen hervorgehoben werden.

- Zur **Erzeugung der CQI-Karten** wurden auf zwei Strecken Messwerte gesammelt und anschließend georeferenziert, also dem Straßennetz zugeordnet. Die Bestimmung der Abschnitte der CQI-Karte, also den Bereichen, denen ein identischer gemittelter CQI-Wert zugeordnet wird, erfolgt durch die **Segmentierung**. Üblicherweise erfolgt die Segmentierung durch Unterteilung der Strecke in Abschnitte fester Länge. Diese Verfahren berücksichtigen allerdings nicht den Verlauf der CQI-Werte, es wird also nicht geprüft, ob eine Segmentgrenze an einer optimalen Stelle gesetzt wurde. Durch Anwendung des Jump-Penalization (Jump-P) Algorithmus, eines Algorithmus zur Entrauschung abschnittsweiser konstanter Signale, auf das Problem der Segmentierung einer CQI-Karte konnte verglichen mit der Verwendung einer festen Länge von 50 m eine nahezu identische Leistung erreicht werden. Der mittlere quadratischen Fehler lag beim Jump-P Algorithmus nur 0,2 % (Stecke 1) bzw.



0,6 % (Strecke 2) über dem Wert des Feste-Länge-Algorithmus, wobei aber nur ein Drittel an Segmenten benötigt wurden.

Zur Validierung des Konzeptes, eine CQI-Karte zur Prädiktion der erreichbaren Datendurchsätze zu verwenden, wurden die CQI-abhängigen gemessenen mit den maximal erreichbaren Datendurchsätzen verglichen. Hierfür wurden **Formeln** hergeleitet, aus denen in Abhängigkeit des CQI sowie der HSDPA-Netzwerkconfiguration die maximalen Durchsätze auf IP-, TCP- und Applikationsebene berechnet werden können. Dieser Vergleich wie auch die diskreten kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen zeigen deutlich die Validität des vorgeschlagenen Konzeptes.

- Die Leistungsfähigkeit der Luftschnittstelle hat einen großen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit mobiler Anwendungen. Innerhalb einer Simulationsumgebung muss der Mobilfunkkanal daher so realistisch wie möglich nachgebildet werden. Dies beinhaltet insbesondere die Generierung von Netzlast, also der Last, die von anderen, gleichzeitig aktiven Nutzern hervorgerufen wird. Speziell für HSDPA wurde ein **neuartiger Netzlastgenerator** entwickelt, der Last erzeugt, indem zusätzliche, synthetische Endgeräte an der Ressourcenverteilung im Scheduler des NodeB teilnehmen. Diesen synthetischen Endgeräten werden Ressourcen der Luftschnittstelle zugeordnet, wodurch die gewünschte Netzlast entsteht. Das Netzlastmodell, also die Beschreibung der Anzahl aktiver synthetischer Endgeräte als Funktion der Zeit, wurde aus den zur Erzeugung der CQI-Karte durchgeführten Datendurchsatzmessungen abgeleitet. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Luftschnittstelle während der Messungen an der Kapazitätsgrenze betrieben wird. In diesem Fall hängt der in einem Zeitintervall erreichte Datendurchsatz von der Ressourcenverteilung durch den Scheduler ab, der Datenfluss ist weitgehend von den Steuerungsmechanismen von TCP entkoppelt. Das Verfahren zur schedulerbasierten Lastgenerierung wurde durch Vergleich der gemessenen mit den simulierten Daten erfolgreich validiert. Die Ergebnisse zeigen die Eignung des Verfahrens, die simulierten Daten kommen der Realität sehr nahe.
- Zur Optimierung der Datenübertragung von einem Server zu den Fahrzeugen über TCP/IP wird ein Modell benötigt, mit dem die zu erwartenden Übertragungsdauern sowie Ausnutzungen der Luftschnittstelle geschätzt werden können. Es wurde ein **kennlinienbasierter Ansatz** vorgeschlagen, der auf Basis des CQI-Verlaufs sowie der Anzahl gleichzeitig aktiver UE durch abschnittsweise Integration bzw. Aufsummierung die gewünschten Werte berechnet. Es wurden Regeln vorgestellt, die die Überlappungseigenschaften aufeinander folgender Datenobjekte festlegen. Diese Regeln sollen sicherstellen, dass sich aus Sicht des Mobilfunknetzes ein konstanter Datenstrom ergibt, der den Bedingungen während der Messfahrten entspricht. Andernfalls müsste in Frage gestellt werden, ob das im vorherigen Absatz beschriebene, aus diesen Messdaten abgeleitete Netzlastmodell, angewendet werden darf. Auf Basis der Schätzungen des Modells kann eine mögliche Sendereihenfolge bewertet und mit anderen Sendereihenfolgen zur Findung einer optimalen Lösung

verglichen werden. Hierzu wurde zunächst das Optimierungsproblem mathematisch formuliert, und es wurden **drei Verfahren zur Lösung** vorgestellt. Bei diesen Verfahren handelt es sich um einen genetischen Algorithmus (GA) sowie die Heuristiken Simulated Annealing (SA) und Hillclimbing (HC). Als Referenzverfahren dient eine einfache Earliest Deadline First-Heuristik (EDF), die die Datenobjekte in der Reihenfolge des spätesten Zustellzeitpunktes (der Deadline) versendet.

- Die **Evaluation** des im vorherigen Absatzes vorgestellten Modells sowie der Verfahren zur Optimierung der Datenübertragung wurde anhand von insgesamt 768 unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Diese Szenarien adressieren unterschiedliche realitätsnahe Anwendungsfälle und decken verschiedene geografische Gebiete ab. Es werden drei Methoden zur Vorhersage der CQI-Verläufe der Fahrzeuge verwendet. Neben der Verwendung der CQI-Karte lag einerseits vollständiges Wissen über die zukünftigen CQI-Werte vor, andererseits wurde bei der Verwendung der von den Fahrzeugen gemeldeten CQI auf a priori Wissen verzichtet. Die Anzahl zusätzlich aktiver UE ist fest, bzw. es wurde der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte schedulerbasierte Netzlastgenerator verwendet.

Die Evaluation des Modells zur Berechnung von Übertragungsdauer und Kanalausnutzung erfolgte durch Vergleich der Schätzungen mit den Simulationsergebnissen für die EDF-Heuristik. Diese Heuristik garantiert eine unveränderte Reihenfolge der Datenobjekte während der Übertragung. Im Falle des besten a priori Wissens, also unter Verwendung des CQI-Vorhersagemodells „vollständiges Wissen“ sowie einer festen Anzahl zusätzlich aktiver UE, liegen der mittlere Schätzfehler der Kanalausnutzung sowie der Gesamtübertragungsdauer bei 0,004 bzw. 0,9 %. Die Ergebnisse unterstreichen die Güte des vorgestellten Verfahrens.

Die Optimierungsverfahren GA, SimA und HC wurden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, also des Potenzials zur Verbesserung der Kanalausnutzung bei gleichzeitiger Berücksichtigung individueller Deadlines von Datenobjekten, untersucht. Als Referenz diente die EDF-Heuristik. Die besten Ergebnisse konnten erreicht werden, wenn vollständiges Wissen über die CQI-Verläufe sowie über die Zahl der gleichzeitig aktiven UE vorhanden war. In Einzelfällen konnten Verbesserungen der Kanalausnutzung von 69 % bzw. Verringerungen der Gesamtübertragungsdauer von 51 % erreicht werden. Gleichzeitig wurde die Zahl zu spät zugestellten Datenobjekte signifikant reduziert. Mit abnehmenden Wissen nahm auch die Qualität der Optimierungsergebnisse ab. Bei Verwendung des zuletzt von den Fahrzeugen gelieferten CQI in Verbindung mit aktivierten Zellwechseln kann nur noch eine geringe Verbesserung der Kanalausnutzung erreicht werden, die mittlere Verkürzung der Gesamtübertragungsdauer nimmt sogar negative Werte an. Selbiges gilt bei der Verwendung des Netzlastmodells für die als Maß für Verzögerungen verwendete DelayScore-Summe, die für alle Optimierungsstrategien über den Werten der EDF-Heuristik liegt.

Die vorgestellten Algorithmen GA, SimA und HC unterscheiden sich nur geringfü-

gig bzgl. der erreichten Ergebnisse. Da SimA und HC deutlich einfacher in Software umzusetzen sind, sollten diese Algorithmen den Vorzug gegenüber dem GA erhalten.

## 7.2. Übertragbarkeit auf andere Mobilfunksysteme

Diese Arbeit fokussiert sich auf das im Release 5 vom 3GPP spezifizierte HSDPA, welches während der Messfahrten vorgefunden wurde. Zwischenzeitlich sind vom Netzanbieter die weiterentwickelten Mobilfunksysteme Dual Cell HSPA sowie LTE eingeführt worden. Im Folgenden werden diese Systeme hinsichtlich der Anwendbarkeit einer CQI-basierten Optimierung der Datenübertragung kurz diskutiert.

Mit Release 8 wurde die Möglichkeit eingeführt, neben bisher einem nun zwei nebeneinander liegende UMTS-Kanäle zu verwenden und so höhere Datenraten zu erreichen [15]. Das Endgerät empfängt nun Daten von zwei Zellen bzw. Trägerfrequenzen, weswegen dieses Verfahren Dual Cell bzw. Dual Carrier (DC) genannt wird. Um das neue Konzept in das bestehende System zu integrieren, wurde mit MAC-ehs eine neue Schicht eingeführt, die im DC-Modus MAC-hs ersetzt.

Die neu eingeführte MAC-ehs-Schicht nimmt analog zu MAC-hs des Release 5 eingehende MAC-d-PDUs entgegen, übernimmt das Scheduling der Luftschnittstelle und implementiert den Neuübertragungsmechanismus HARQ. Für die Datenübertragung stehen statt einem nun zwei HS-DSCH zur Verfügung, von denen der Scheduler in jedem TTI entweder einen oder beide verwenden kann. Die CQI-Reports vom Endgerät zum NodeB erfolgen pro Kanal, es werden also zwei CQI-Werte geliefert [36], die im übrigen vom verwendeten Modem separat ausgewiesen werden.

Für das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Verfahren ergeben sich damit folgende Konsequenzen: Die CQI-Karte, die in der derzeitigen Form für einen Wert ausgelegt ist, muss um eine zweite Dimension erweitert werden, sowohl bezüglich der Datenablage als auch bzgl. des vorgestellten Jump-P-Segmentierungsalgorithmus. Analog zur CQI-Karte muss die modellbasierte Schätzung von Übertragungsdauer und Kanalausnutzung ebenfalls zweidimensional arbeiten. Da es auf höheren Protokollschichten nicht mehr möglich ist zu differenzieren, über welche der beiden HS-DSCH welcher Anteil der Daten versendet bzw. empfangen wurde, ist von signifikanten Fehlern bei den geschätzten Werten auszugehen. Unter diesen Randbedingungen erscheint eine Übertragbarkeit des Konzepts auf DC-HSDPA zwar möglich, die Güte wird aber hinter der vom Release 5 zurückbleiben.

Ebenfalls mit Release 8 wurde die erste Version von LTE spezifiziert. Im Gegensatz zu UMTS bzw. HSDPA verwendet LTE anstelle eines Übertragungskanal mehrere orthogonale Träger, auf die der Datenstrom aufgeteilt wird. Dieses Verfahren wird Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) genannt [15]. Damit gibt es neben der Zeit mit der Trägerfrequenz eine zweite Dimension. Anstatt eines Transportblocks pro TTI, der im Gegensatz zu HSDPA eine Dauer von 1 ms hat, existieren mehrere zeitlich parallel übertragene Blöcke, wobei jeweils 12 Träger zusammengefasst werden [90].

Analog zu HSDPA wird ebenfalls ein CQI verwendet, um Informationen bzgl. der Kanalqualität auszutauschen. Allerdings gibt es drei unterschiedliche Modi [90]: Im Wideband-Modus wird ein CQI-Wert für das gesamte Frequenzband übertragen. Beim Best-M-Average-Modus werden die Kanalqualitäten für alle Träger individuell geschätzt, und es wird der mittlere CQI für die besten M Träger berechnet, wobei M bei ca. 20 % liegt. Beim Sub-band Feedback wird ein CQI je Träger übermittelt. Anhand der CQI-abhängigen Transportblockgrößen kann nun durch Berücksichtigung des Einflusses des LTE-Protokollstacks die maximal erreichbare IP-Datenrate berechnet werden [91, 92, 93, 94].

Der Aufbau einer CQI-Karte für LTE ist prinzipiell möglich, allerdings können durch die unterschiedlichen Modi unterschiedliche CQI-Werte für identische Empfangsbedingungen geliefert werden. Der jeweilige Modus muss daher beim Aufbau der Karte berücksichtigt werden. Das vorgeschlagene Modell zur Berechnung der Kanalausnutzung sowie der Übertragungsdauer geht davon aus, dass nach einer gewissen Übertragungszeit eine Sättigung des Mobilfunkkanals erreicht wird, also ausreichend Datenpakete in den internen Puffern des Netzwerks vorhanden sind, um einen kontinuierlichen Datenfluss zu gewährleisten. Dieser Bufferbloat-Effekt ist nach [44] in LTE-Netzwerken geringer ausgeprägt als in HSDPA. Damit muss in Frage gestellt werden, ob das vorgestellte Modell angewendet werden darf. Gegebenenfalls muss eine Erweiterung bzw. Neukonzeption erfolgen. Grundsätzlich erscheint eine Übertragbarkeit auf LTE möglich, es ist aber wie im Fall von DC-HSDPA mit einer Abnahme der Güte zu rechnen.

## 7.3. Weitere Arbeiten

In dieser Arbeit wurde untersucht, wie die Datenübertragung per TCP/IP von einem zentralen Server an Fahrzeuge hinsichtlich der Ausnutzung des Mobilfunkkanals unter Berücksichtigung individueller spätester Zustellzeitpunkte optimiert werden kann. Folgende Themen könnten, neben der im vorherigen Abschnitt diskutierten Portierung auf andere Mobilfunksysteme, in zukünftigen Arbeiten betrachtet werden:

- Während der Evaluation wurde der Einfluss von Zellwechsel untersucht. Es zeigte sich, dass bei den verwendeten Szenarien deutlich geringere Verbesserungen der Ausnutzung des Mobilfunkkanals sowie Verkürzungen der Gesamtübertragungsdauer erzielt wurden als bei deaktivierten Zellwechsel. Die Ursache hierfür liegt einerseits in der „Entschärfung“ der Szenarien, da mehrere Zellen und damit mehr Ressourcen involviert sind, andererseits lag kein a priori Wissen über bevorstehende Zellwechsel vor, so dass seitens der Optimierungsstrategie nicht agiert, sondern nur reagiert werden konnte. Die **Einbeziehung von Zellwechseln** könnte zu Verbesserungen führen. Hierfür müssen die Konnektivitätskarte, das Modell zur Schätzung von Übertragungsdauer und Kanalausnutzung sowie das Optimierungsverfahren erweitert werden.
- Derzeit wird davon ausgegangen, dass lediglich die im Rahmen der Szenarien definierten Datenobjekte zu den Fahrzeugen übertragen werden. Weiterer Datenver-

kehr, insbesondere per UDP übertragene Echtzeitdatenströme wie Voice over IP (VoIP), wird nicht betrachtet. Nach einer Erweiterung der erstellten Simulationsumgebung könnte der **Einfluss von Echtzeitdatenströmen** auf das vorgestellte Verfahren untersucht werden. Zu klärende Fragestellungen sind unter anderem, wie groß der Einfluss zusätzlicher Datenströme auf die Prädiktion von Übertragungsdauer und Kanalausnutzung ist und welche Konsequenzen dies auf das Optimierungspotenzial hat. Hierfür muss das Modell zur Prädiktion von Übertragungsdauer und Kanalausnutzung entsprechend ergänzt werden.

- In den vorgestellten Szenarien sind die gesamten Informationen in jeweils einem Datenobjekt gekapselt. Erst wenn dieses Objekt vollständig empfangen wurde, können die Daten von der mobilen Anwendung verwendet werden. Um die Flexibilität beim Finden einer geeigneten Sendereihenfolge zu erhöhen, könnte ein sogenanntes **Level of Detail-Verfahren** untersucht werden. Hierbei werden, analog zu dem von [95] für Daten eines geografischen Informationssystems vorgestellten Konzept, aufeinander aufbauende Detaillierungsstufen (Level of Detail) eingeführt. Beginnend mit der niedrigsten Stufe erweitern alle folgenden Stufen die Information, indem weitere Daten hinzugefügt werden. Am Beispiel einer E-Mail könnten die Stufen „Betreffzeile und Absender“, „Nachrichtentext“ und „Anhang“ definiert werden. Sobald die Daten einer Detaillierungsstufe empfangen wurde, können diese von der mobilen Anwendung verwendet werden. Ein großes Datenobjekt wird damit in viele kleine unterteilt, die unterschiedliche Deadlines und Prioritäten haben. Diese Erweiterung des Suchraums sollte es der Optimierungsstrategie gerade bei hoher Last, also wenig zur Verfügung stehenden Ressourcen, erlauben, Lösungen zu finden, die denen des jetzigen Konzeptes überlegen sind.



# A CQI-Tabelle B

CQI	Größe Transportblock	Anzahl an HS-PDSCH	Modulation	Anpassung Referenzleistung	NIR	X <sub>rv</sub>
0	N/A	außer Reichweite				
1	137	1	QPSK	0	19200	0
2	173	1	QPSK	0		
3	233	1	QPSK	0		
4	317	1	QPSK	0		
5	377	1	QPSK	0		
6	461	1	QPSK	0		
7	650	2	QPSK	0		
8	792	2	QPSK	0		
9	931	2	QPSK	0		
10	1262	3	QPSK	0		
11	1483	3	QPSK	0		
12	1742	3	QPSK	0		
13	2279	4	QPSK	0		
14	2583	4	QPSK	0		
15	3319	5	QPSK	0		
16	3565	5	16-QAM	0		
17	4189	5	16-QAM	0		
18	4664	5	16-QAM	0		
19	5287	5	16-QAM	0		
20	5887	5	16-QAM	0		
21	6554	5	16-QAM	0		
22	7168	5	16-QAM	0		
23	9719	7	16-QAM	0		
24	11418	8	16-QAM	0		
25	14411	10	16-QAM	0		
26	14411	10	16-QAM	-1		
27	14411	10	16-QAM	-2		
28	14411	10	16-QAM	-3		
29	14411	10	16-QAM	-4		
30	14411	10	16-QAM	-5		

Tabelle A.1.: CQI Mapping Tabelle B





## B Messung der RRC-Konfiguration

Im Folgenden wird das zur Messung der RRC-Konfiguration eingesetzte Verfahren vorgestellt, das auf Basis des Internet Control Message Protocol (ICMP) sowie des Linux-Dienstprogramms *ping* implementiert ist. Mittels ICMP können sogenannte Echo-Anfragen (Pings) verschickt werden, die von der Gegenstelle quittiert werden. Als Ergebnis wird die Round Trip Time (RTT), also die Laufzeit der Anfrage, geliefert. Das im Folgenden präsentierte Verfahren orientiert sich an der Arbeit von [27].

Ein ICMP-Paket besteht aus einem IP-Header mit einer Länge von 20 Byte, dem 8 Byte langem ICMP-Header sowie dem ICMP-Payload. Der Payload hat bei dem verwendeten Programm *ping* eine minimale Länge von 8 Byte, so dass sich eine minimale Größe des ICMP-Pakets von 36 Byte ergibt.

Wie auch von [26] festgestellt unterscheiden sich die RTTs von Pings signifikant zwischen den Zuständen CELL\_FACH und CELL\_DCH. Die Messungen an dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten HSDPA-Netz ergaben für Pings mit 100 Bytes Nutzdaten mittlere RTT von 397,31 ms (CELL\_FACH) sowie 95,49 ms (CELL\_DCH). Es ist also möglich, den aktuellen RRC-Zustand neben den Ausgaben des Modems auf AT-Befehle aus den gemessenen RTT abzuleiten.

### Setup-Zeit CELL\_FACH

Die Setup-Zeit CELL\_FACH bezeichnet die Dauer, die benötigt wird, um von CELL\_PCH in den CELL\_FACH-Zustand zu wechseln. Zur Messung wird, während sich das Modem im Zustand CELL\_PCH befindet, ein Ping mit einer Gesamtgröße von 36 Byte versendet. Die mittlere RTT der Ping-Nachrichten beträgt 761,55 ms und enthält die Zeit, die zum Wechsel des Zustands benötigt wird sowie die eigentliche Laufzeit der Daten. Die mittlere Setup-Zeit CELL\_FACH ergibt sich damit nach Subtraktion der mittleren Ping-RTT im CELL\_FACH-Zustand von 229,45 ms zu 532,1 ms.

### Pufferbelegung Wechsel CELL\_DCH

Der Wechsel vom Zustand CELL\_FACH in den Zustand CELL\_DCH erfolgt, wenn die Pufferbelegung im RNC einen Schwellwert überschreitet. Zur Ermittlung des Schwellwerts werden, während sich das Modem im CELL\_FACH-Zustand befindet, Ping-Nachrichten mit aufsteigender Nutzdatenmenge gesendet. Anhand der gemessenen RTT kann festgestellt werden, bei welcher Größe der Zustandswechsel erfolgt. Der Schwellwert liegt bei 334 Byte Nutzdaten, also einer Paketgröße von 362 Byte.

	Zustand	Mittelwert
Setup-Zeit	CELL_FACH	532,1 ms
Setup-Zeit	CELL_DCH	1112,55 ms
Pufferbelegung Wechsel	CELL_DCH	362 Byte
Inaktivitätsdauer	CELL_DCH	2 s
Inaktivitätsdauer	CELL_FACH	2 s

Tabelle B.1.: RRC-Konfiguration des verwendeten HSDPA-Netzwerks

## Setup-Zeit CELL\_DCH

Die Setup-Zeit CELL\_DCH bezeichnet die Dauer des Wechsels vom Zustand CELL\_FACH in den Zustand CELL\_DCH. Die Messung erfolgt analog zur Bestimmung der Setup-Zeit CELL\_FACH. Während sich das Modem im Zustand CELL\_FACH befindet, wird ein Ping mit einer Größe von 350 Byte Nutzdaten verwendet. Diese Datenmenge reicht aus, um einen für den Zustandswechsel ausreichende Pufferbelegung herbeizuführen. Der mittlere RTT beträgt 1239,3 ms und enthält neben der Zeit zum Zustandswechsel die eigentliche Laufzeit der Daten, die im Mittel bei 126,75 ms liegt. Die mittlere Dauer zum Zustandswechsel beträgt damit 1112,55 ms.

## Inaktivitätsdauer CELL\_DCH

Der Zustand CELL\_DCH wird verlassen, wenn für eine gewisse Dauer keine Daten im Puffer des RNC vorhanden sind. Zur Messung dieser Inaktivitätsdauer wird das Modem in den Zustand CELL\_DCH versetzt. Dann werden in wachsenden Zeitabständen Pings mit einer Nutzdatengröße von 36 Byte gesendet. Ab einem Zeitabstand von 2 s (Inaktivitätsdauer) wurde der DCH-Zustand verlassen. Allerdings fand kein Rücksprung zu CELL\_FACH statt, sondern es wurde direkt in den Zustand CELL\_PCH gewechselt.

## Inaktivitätsdauer CELL\_FACH

Die Messung der Inaktivitätsdauer des Zustands CELL\_FACH wird analog zur Messung der Inaktivitätsdauer CELL\_DCH durchgeführt. Die Inaktivitätsdauer vor einem Wechsel in den Zustand CELL\_PCH beträgt ebenfalls 2 s.

## Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle B.1 fasst die Ergebnisse der Messungen zusammen.

# C Nachrichtenschnittstelle

Die Simulationsumgebung besteht aus zwei Teilen, die als eigene Prozesse ausgeführt werden. Bei diesen Teilen handelt es sich um die in der Programmiersprache Java implementierte Logik des Servers sowie der Clients sowie die in C++ realisierte Simulation des HSDPA-Netzes. Der Datenaustausch bzw. die Steuerung findet über eine Nachrichtenschnittstelle statt, die auf Basis des Datenformats *Protobuf* [96] entwickelt wurde. Tabelle C.1 fasst die Schnittstelle zusammen, wobei die Abkürzungen bei der Senderichtung für (N)etzwerksimulator sowie (O)ptimierer (Server und Clients) stehen.

Nachricht	Inhalt	Richtung
Simulationszeit/Timer	Bereitstellung der aktuellen Simulationszeit sowie Signalisierung von Timerereignissen	N->O
Setzen CQI	Setzen des aktuellen CQI (nur Client/UE)	O->N
Zellwechsel	Durchführung eines Zellwechsels (nur Client/UE)	O->N
Versenden von Daten	Versenden eines Datenobjektes (nur Server)	O->N
Status Datenübertragung	Signalisierung der Menge übertragener Daten inkl. Kanalausnutzung	N->O
Datenobjekt übertragen	Signalisierung, dass ein Datenobjekt vollständig übertragen wurde	N->O
Setzen Timer	Setzen eines Timers	O->N

Tabelle C.1.: Die Nachrichtenschnitte der Simulationsumgebung



# Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ADAS	Advanced Driver Assistance System
AM	Acknowledged Mode
BLER	Block Error Rate
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CQI	Channel Quality Indicator
CTCH	Common Traffic Channel
DASH	Dynamic Adaptive Streaming over HTTP
DC	Dual Cell bzw. Dual Carrier
DTCH	Dedicated Traffic Channel
EDF	Earliest Deadline First
FACH	Forward Access Channel
FDD	Frequency Division Duplex
GA	Genetischer Algorithmus
GGSN	Gateway GPRS Support Node
HARQ	Hybrid automatic repeat request
HC	Hillclimbing
HS-DCH	High Speed Decicated Channel
HS-DPCCH	High Speed Dedicated Physical Control Channel
HS-PDSCH	High Speed Physical Downlink Shared Channel
HS-SCCH	High Speed Shared Control Channel
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access

HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICMP	Internet Control Message Protocol
IP	Internet Protocol
LAC	Location Area Code
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MCC	Mobile Country Code
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MNC	Mobile Network Code
NAT	Network Address Translation
NDS	Navigation Data Standard
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCH	Paging Channel
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol
PDU	Protocol Data Unit
PF	Proportional Fair
PSC	Primary Scrambling Code
QAM	Quadraturamplitudenmodulation
QoS	Quality of Service
RLC	Radio Link Control
RMSE	Root Mean Square Error
RNC	Radio Network Controller
RNG	Random Number Generator
RNS	Radio Network Subsystem
RR	Round-Robin
RRC	Radio Resource Control
RTT	Round Trip Time
SDU	Service Data Unit

SF	Spreizfaktor
SGSN	Serving GPRS Support Node
SimA	Simulated Annealing
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TM	Transparent Mode
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VANET	Vehicular Ad Hoc Networks
VoIP	Voice over IP
WCDMA	Wide Code Division Multiplex Access
WGS	World Geodetic System
WLAN	Wireless Local Area Network





# Literaturverzeichnis

- [1] BAUER, Stefan: Das vernetzte Fahrzeug - Herausforderungen für die IT. In: *Informatik-Spektrum* 34 (2011), 38-41. <http://dx.doi.org/10.1007/s00287-010-0504-9>. – ISSN 0170–6012. – 10.1007/s00287-010-0504-9
- [2] TELEFONICA: Connected Car Industry Report 2014. (2014). <http://blog.digital.telefonica.com/?press-release=connected-car-2014>
- [3] WOLLSCHLÄGER, Dirk: Das vernetzte Fahrzeug Voraussetzungen, Anforderungen und Perspektiven. In: *ATZe Elektronik* 9 (2014), Nr. 4, S. 10–15
- [4] BMW: *BMW CONNECTED DRIVE*. <http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/connecteddrive/ubersicht.html>, Abruf: 23.05.2015. Online
- [5] AUDI: *Audi connect*. <http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/layer/audi-connect-lp.html>, Abruf: 23.5.2015. online
- [6] VOLKSWAGEN: *Volkswagen Car-Net*. <http://volkswagen-carnet.com/de/de/start.html>, Abruf: 23.5.2015. online
- [7] MERCEDES-BENZ: *Mercedes connect me*. <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-me/konnektivitaet/>, Abruf: 25.03.2015. Online
- [8] PÖGEL, Tobias ; WOLF, Lars C.: Prediction of 3G Network Characteristics for Adaptive Vehicular Connectivity Maps (Poster). In: *2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC) (VNC 2012)*. Seoul, Korea, November 2012
- [9] YAO, Jun: *A Framework for Improving QoS in Mobile Computing*, School of Computer Science and Engineering, The University of New South Wales, Diss., 2011
- [10] Tso, Fung P. ; TENG, Jin ; JIA, Weijia ; XUAN, Dong: Mobility: a double-edged sword for HSPA networks: a large-scale test on Hong Kong mobile HSPA networks. In: *Proceedings of the eleventh ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (MobiHoc '10). – ISBN 978–1–4503–0183–1, 81–90
- [11] NIIDA, S. ; UEMURA, S. ; NAKAMURA, H.: Mobile Services. In: *Vehicular Technology Magazine, IEEE* 5 (2010), sept., Nr. 3, S. 61 –67. <http://dx.doi.org/10.1109/MVT.2010.937850>. – DOI 10.1109/MVT.2010.937850. – ISSN 1556–6072
- [12] HARTENSTEIN, Hannes ; LABERTEAUX, Kenneth: *VANET vehicular applications and inter-networking technologies*. Bd. 1. John Wiley & Sons, 2009

- [13] CISCO: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019. (2015). [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html)
- [14] HOLMA, Harri ; TOSKALA, Antti: *HSDPA/HSUPA for UMTS*. Wiley, 2006 (ISBN-13 978-0-470-01884-2 (HB) ISBN-10 0-470-01884-4 (HB) 259)
- [15] SAUTER, M.: *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: UMTS, HSDPA und LTE, GSM, GPRS und Wireless LAN*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010 <http://books.google.de/books?id=cijWuW7TdSoC>. – ISBN 9783834814074
- [16] ASSAAD, Mohamad ; ZEGHLACHE, Djamal: *TCP performance over UMTS-HSDPA systems*. CRC Press, 2006
- [17] WANG, Zhaoguang ; QIAN, Zhiyun ; XU, Qiang ; MAO, Zhuoqing ; ZHANG, Ming: An Untold Story of Middleboxes in Cellular Networks. In: *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (SIGCOMM '11). – ISBN 978-1-4503-0797-0, 374–385
- [18] JOHNSON, Chris: *Radio access networks for UMTS: principles and practice*. John Wiley & Sons, 2011
- [19] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Radio interface protocol architecture (3GPP TS 25.301)*. Version 11.0.0 Release 11. 3GPP, 09 2012
- [20] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification (3GPP TS 25.323)*. Version 11.0.0 Release 11. 3GPP, 09 2012
- [21] PABLO TAPIA, Yasmin Karimli Martin J. F. Jun Liu L. Jun Liu: *HSPA Performance and Evolution: A Practical Perspective*
- [22] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Radio Link Control (RLC) protocol specification (3GPP TS 25.322)*. Version 10.1.0 Release 10. 3GPP, 07 2011
- [23] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Medium Access Control (MAC) protocol specification (3GPP TS 25.321)*. Version 11.2.0 Release 11. 3GPP, 10 2012
- [24] JIANG, Haiqing ; WANG, Yaogong ; LEE, Kyunghan ; RHEE, Injong: Tackling Bufferbloat in 3G/4G Networks. In: *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Internet Measurement Conference*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (IMC '12). – ISBN 978-1-4503-1705-4, 329–342
- [25] NECKER, M.C. ; WEBER, A.: Parameter Selection for HSDPA Iub Flow Control. In: *Wireless Communication Systems, 2005. 2nd International Symposium on*, 2005, S. 233–237

- [26] PERALA, P.H.J. ; BARBUZZI, A. ; BOGGIA, G. ; PENTIKOUSIS, K.: Theory and Practice of RRC State Transitions in UMTS Networks. In: *GLOBECOM Workshops, 2009 IEEE*, 2009, S. 1–6
- [27] QIAN, Feng ; WANG, Zhaoguang ; GERBER, Alexandre ; MAO, Zhuoqing M. ; SEN, Subhabrata ; SPATSCHECK, Oliver: Characterizing Radio Resource Allocation for 3G Networks. In: *Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (IMC '10). – ISBN 978–1–4503–0483–2, 137–150
- [28] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*. Version 11.9.0 Release 11. 3GPP, 03 2014
- [29] QIAN, Feng ; WANG, Zhaoguang ; GERBER, Alexandre ; MAO, Zhuoqing ; SEN, Subhabrata ; SPATSCHECK, Oliver: Profiling Resource Usage for Mobile Applications: A Cross-layer Approach. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. New York, NY, USA : ACM, 2011 (MobiSys '11). – ISBN 978–1–4503–0643–0, 321–334
- [30] SOLDANI, David ; LI, Man ; CUNY, Renaud: *QoS and QoE management in UMTS cellular systems*. John Wiley & Sons, 2007
- [31] BROUWER, F. ; BRUIN, I. de ; SILVA, J.C. ; SOUTO, N. ; CERCAS, F. ; CORREIA, A.: Usage of link-level performance indicators for HSDPA network-level simulations in E-UMTS. In: *Spread Spectrum Techniques and Applications, 2004 IEEE Eighth International Symposium on*, 2004, S. 844 – 848
- [32] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical layer procedures (FDD) (3GPP TS 25.214)*. Version 10.6.0 Release 10. 3GPP, 03 2012
- [33] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); UE Radio Access capabilities (3GPP TS 25.306)*. Version 10.6.0 Release 10. 3GPP, 03 2012
- [34] JURVANSUU, M. ; PROKKOLA, J. ; HANSKI, M. ; PERALA, P.: HSDPA Performance in Live Networks. In: *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, 2007, S. 467–471
- [35] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Multiplexing and channel coding (FDD) (3GPP TS 25.212)*. Version 12.0.0 Release 12. 3GPP, 09 2014
- [36] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 25.308)*. Version 11.8.0 Release 11. 3GPP, 03 2014
- [37] AL-MANTHARI, B. ; HASSANEIN, H. ; NASSER, N.: Packet scheduling in 3.5G high-speed downlink packet access networks: breadth and depth. In: *Network, IEEE* 21 (2007), Nr. 1, S. 41–46. <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2007.314537>. – DOI 10.1109/MNET.2007.314537. – ISSN 0890–8044

- [38] JALALI, A. ; PADOVANI, R. ; PANKAJ, R.: Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system. In: *Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st Bd. 3, 2000.* – ISSN 1090–3038, S. 1854–1858 vol.3
- [39] KOLDING, T.E.: Link and system performance aspects of proportional fair scheduling in WCDMA/HSDPA. In: *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th Bd. 3, 2003.* – ISSN 1090–3038, S. 1717–1722 Vol.3
- [40] HAIDER, A. ; HARRIS, R.: A Novel Proportional Fair Scheduling Algorithm for HSDPA in UMTS Networks. In: *Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, 2007. AusWireless 2007. The 2nd International Conference on, 2007, S. 43–43*
- [41] PÖGEL, Tobias ; WOLF, Lars C.: Analysis of Operational 3G Network Characteristics for Adaptive Vehicular Connectivity Maps. In: *WCNC 2012 Workshop on Wireless Vehicular Communications and Networks (W5 - Wireless Vehicular Communications and Networks).* Paris, France, April 2012
- [42] ALLMAN, M. ; PAXSON, V. ; STEVENS, W.: *TCP Congestion Control.* RFC 2581 (Proposed Standard). <http://www.ietf.org/rfc/rfc2581.txt>. Version: April 1999 (Request for Comments). – Obsoleted by RFC 5681, updated by RFC 3390
- [43] GETTYS, Jim ; NICHOLS, Kathleen: Bufferbloat: Dark Buffers in the Internet. In: *Queue* 9 (2011), November, Nr. 11, 40:40–40:54. <http://dx.doi.org/10.1145/2063166.2071893>. – DOI 10.1145/2063166.2071893. – ISSN 1542–7730
- [44] ALFREDSSON, Stefan ; DEL GIUDICE, Giacomo ; GARCIA, Johan ; BRUNSTROM, Anna ; DE CICCIO, Luca ; MASCOLO, Saverio: Impact of TCP Congestion Control on Bufferbloat in Cellular Networks. In: *Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2013) ;, 2013*
- [45] *OpenSignal.* <http://opensignal.com/>, Abruf: 08.02.2015. Online
- [46] RIISER, Haakon ; ENDESTAD, Tore ; VIGMOSTAD, Paul ; GRIWODZ, Carsten ; HALVORSEN, Pål: Video streaming using a location-based bandwidth-lookup service for bitrate planning. In: *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.* 8 (2012), August, Nr. 3, 24:1–24:19. <http://dx.doi.org/10.1145/2240136.2240137>. – DOI 10.1145/2240136.2240137. – ISSN 1551–6857
- [47] KELCH, Lutz ; PÖGEL, Tobias ; WOLF, Lars ; SASSE, Andreas: CQI Maps for Optimized Data Distribution. In: *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2013 IEEE 78th, 2013.* – ISSN 1090–3038, S. 1–5
- [48] MARTÍNEZ, Miquel ; ANDRÉS, David de ; RUIZ, Juan-Carlos ; HASSAN, Mahbub ; KANHERE, Salil: Towards changing the user perception of mobile communications

- through geotagged information. In: *Proceedings of the 1st European Workshop on AppRoaches to MObiquiTous Resilience*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (ARMOR '12). – ISBN 978–1–4503–1150–2, 5:1–5:6
- [49] SCHULMAN, Aaron ; NAVDA, Vishnu ; RAMJEE, Ramachandran ; SPRING, Neil ; DESHPANDE, Pralhad ; GRUNEWALD, Calvin ; JAIN, Kamal ; PADMANABHAN, Venkata N.: Bartendr: A Practical Approach to Energy-aware Cellular Data Scheduling. In: *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (MobiCom '10). – ISBN 978–1–4503–0181–7, 85–96
- [50] COTTINGHAM, David N.: *Vehicular wireless communication*, University of Cambridge, Diss., 01 2009
- [51] PÖGEL, Tobias ; LÜBBE, Jan ; WOLF, Lars C.: Passive Client-based Bandwidth and Latency Measurements in Cellular Networks. In: *Global Internet Symposium 2012 (GI 2012)*. Orlando, Florida, USA, März 2012
- [52] POGEL, T. ; WOLF, L.: Optimization of GSM/UMTS Inter-System Handover times provided by Connectivity Maps. In: *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on*, 2013, S. 641–646
- [53] ASSOCIATION, National Marine E. u. a.: NMEA 0183 standard. In: *National Marine Electronic Association Publications/Standards* (2003)
- [54] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; AT command set for User Equipment (UE) (3GPP TS 27.007)*. Version 10.7.0 Release 10. 3GPP, 03 2012
- [55] JACOBSON, V. ; BRADEN, R. ; BORMAN, D.: *TCP Extensions for High Performance*. RFC 1323 (Proposed Standard). <http://www.ietf.org/rfc/rfc1323.txt>. Version: Mai 1992 (Request for Comments). – Obsoleted by RFC 7323
- [56] NAVIGATION DATA STANDARD (NDS) E.V.: *Navigation Data Standard*. <http://www.nds-association.org/>, Abruf: 20.10.2012. Online
- [57] QUDDUS, MohammedA. ; OCHIENG, WashingtonYotto ; ZHAO, Lin ; NOLAND, RobertB.: A general map matching algorithm for transport telematics applications. In: *GPS Solutions* 7 (2003), 157-167. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-003-0069-z>. – ISSN 1080–5370. – 10.1007/s10291-003-0069-z
- [58] LITTLE, Max A. ; JONES, Nick S.: Generalized methods and solvers for noise removal from piecewise constant signals. I. Background theory. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* 467 (2011), November, Nr. 2135, 3088–3114. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2010.0671>. – DOI 10.1098/rspa.2010.0671
- [59] LITTLE, Max A. ; JONES, Nick S.: Generalized methods and solvers for noise removal from piecewise constant signals. II. New methods. In: *Proceedings of the Royal Society*

- A: Mathematical, Physical and Engineering Science* (2011), Juni. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2010.0674>. – DOI 10.1098/rspa.2010.0674
- [60] 3GPP (Hrsg.): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Common test environments for User Equipment; Conformance testing (3GPP TS 34.108)*. Version 10.0.0 Release 10. 3GPP, 03 2012
- [61] YERIMA, S.Y. ; AL-BEGAIN, K.: An Enhanced Buffer Management Scheme for Multimedia Traffic in HSDPA. In: *Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2007. NGMAST '07. The 2007 International Conference on*, 2007, S. 292–297
- [62] BODROG, Levente ; HORVÁTH, Gábor ; VULKÁN, Csaba: Analytical TCP Throughput Model for HSDPA. In: *Nokia Siemens Networks, Budapest, Hungary, csaba.vulkan@nsn.com* (2006)
- [63] KELCH, Lutz ; PÖGEL, Tobias ; WOLF, Lars ; SASSE, Andreas: Traffic Generator for HSDPA Network Simulations. In: *International Conference on Connected Vehicles & Expo (ICCVE 2014)*, 2014
- [64] *The Network Simulator - ns-2*. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, Abruf: 20.07.2013. Online
- [65] MUTAIRI, Abdulmohsen M. ; BAROUDI, Uthman A.: NS-2 enhancements for detailed HSDPA simulations. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*. ICST, Brussels, Belgium, Belgium : ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008 (ValueTools '08). – ISBN 978–963–9799–31–8, 72:1–72:7
- [66] NECKER, M.C. ; WEBER, A.: Impact of Iub flow control on HSDPA system performance. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on* Bd. 3, 2005, S. 1703–1707 Vol. 3
- [67] WEIGLE, M.C. ; ADURTHI, P. ; HERNÁNDEZ-CAMPOS, F. ; JEFFAY, K. ; SMITH, F.D.: Tmix: a tool for generating realistic TCP application workloads in ns-2. In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 36 (2006), Nr. 3, S. 65–76
- [68] HANDLEY, M. ; PADHYE, J. ; FLOYD, S.: *TCP Congestion Window Validation*. RFC 2861 (Experimental). <http://www.ietf.org/rfc/rfc2861.txt>. Version: Juni 2000 (Request for Comments)
- [69] HERBERG, U. ; TAYLOR, I.: Development Framework for Supporting Java NS2 Routing Protocols. In: *Future Information Technology (FutureTech), 2010 5th International Conference on* IEEE, 2010, S. 1–5
- [70] KRAJZEWICZ, Daniel ; ERDMANN, Jakob ; BEHRISCH, Michael ; BIEKER, Laura: Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. In: *International Journal On Advances in Systems and Measurements* 5 (2012), December, Nr. 3&4, 128–138. <http://elib.dlr.de/80483/>

- [71] KRAUSS, Stefan ; WAGNER, Peter ; GAWRON, Christian: Metastable states in a microscopic model of traffic flow. In: *Physical Review E* 55 (1997), Nr. 5, S. 5597
- [72] CAO, Jin ; CLEVELAND, William S. ; GAO, Yuan ; JEFFAY, Kevin ; SMITH, F D. ; WEIGLE, Michele: Stochastic models for generating synthetic HTTP source traffic. In: *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* Bd. 3 IEEE, 2004, S. 1546–1557
- [73] FELDMANN, Anja ; GILBERT, Anna C. ; HUANG, Polly ; WILLINGER, Walter: Dynamics of IP traffic: a study of the role of variability and the impact of control. In: *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 29 (1999), August, Nr. 4, 301–313. <http://dx.doi.org/10.1145/316194.316235>. – DOI 10.1145/316194.316235. – ISSN 0146–4833
- [74] NSWEB - A HTTP/1.1 Extension to the NS-2 Network Simulator. <http://www.net.t-labs.tu-berlin.de/~joerg/nsweb/>, Abruf: 06.07.2013. online
- [75] HERNANDEZ-CAMPOS, Felix ; JEFFAY, K. ; SMITH, F.D.: Modeling and generating TCP application workloads. In: *Broadband Communications, Networks and Systems, 2007. BROADNETS 2007. Fourth International Conference on*, 2007, S. 280–289
- [76] LANER, Markus ; SVOBODA, P. ; SCHWARZ, S. ; RUPP, M.: Users in cells: A data traffic analysis. In: *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, 2012. – ISSN 1525–3511, S. 3063–3068
- [77] BOTTA, Alessio ; DAINOTTI, Alberto ; PESCAPÉ, Antonio: A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios. In: *Comput. Netw.* 56 (2012), Oktober, Nr. 15, 3531–3547. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2012.02.019>. – DOI 10.1016/j.comnet.2012.02.019. – ISSN 1389–1286
- [78] PADHYE, Jitendra ; FIROIU, Victor ; TOWSLEY, Don ; KUROSE, Jim: Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation. In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* Bd. 28 ACM, 1998, S. 303–314
- [79] PADHYE, Jitendra ; FIROIU, Victor ; TOWSLEY, Donald F. ; KUROSE, James F.: Modeling TCP Reno performance: a simple model and its empirical validation. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)* 8 (2000), Nr. 2, S. 133–145
- [80] ASSAAD, M. ; ZEGHLACHE, D.: Cross-Layer design in HSDPA system to reduce the TCP effect. In: *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 24 (2006), March, Nr. 3, S. 614–625. <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2005.862414>. – DOI 10.1109/JSAC.2005.862414. – ISSN 0733–8716
- [81] GERDES, I. ; KLAWONN, F. ; KRUSE, R.: *Evolutionäre Algorithmen*. Vieweg+Teubner Verlag, 2004 (Computational Intelligence). <http://books.google.de/books?id=TBd6rWMLCqcC>. – ISBN 9783528055707

- [82] LIU, Cong ; BASKIYAR, S.: Scheduling Mixed Tasks with Deadlines in Grids Using Bin Packing. In: *Parallel and Distributed Systems, 2008. ICPADS '08. 14th IEEE International Conference on*, 2008. – ISSN 1521-9097, S. 229–236
- [83] DAVIS, Lawrence: Applying adaptive algorithms to epistatic domains. In: *IJCAI Bd. 85*, 1985, S. 162–164
- [84] CHANG, Yaw ; CHEN, Lin: Solve the vehicle routing problem with time windows via a genetic algorithm. In: *Discrete and Continuous Dynamical System Supplement 2007 (2007)*, S. 240–249
- [85] LASZEWSKI, G. von: Intelligent Structural Operators for the k-way Graph Partitioning Problem. In: *Proc. of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. San Diego, CA, 1991, S. 45–52
- [86] WHITE, DavidR.: Software review: the ECJ toolkit. In: *Genetic Programming and Evolvable Machines* 13 (2012), Nr. 1, 65-67. <http://dx.doi.org/10.1007/s10710-011-9148-z>. – DOI 10.1007/s10710-011-9148-z. – ISSN 1389-2576
- [87] HENDERSON, Darrall ; JACOBSON, SheldonH. ; JOHNSON, AlanW.: The Theory and Practice of Simulated Annealing. Version: 2003. [http://dx.doi.org/10.1007/0-306-48056-5\\_10](http://dx.doi.org/10.1007/0-306-48056-5_10). In: GLOVER, Fred (Hrsg.) ; KOCHENBERGER, GaryA. (Hrsg.): *Handbook of Metaheuristics* Bd. 57. Springer US, 2003. – DOI 10.1007/0-306-48056-5\_10. – ISBN 978-1-4020-7263-5, 287-319
- [88] ISO (Hrsg.): *ISO/IEC 23009-1:2014 – Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH) – Part 1: Media presentation description and segment formats*. ISO
- [89] LEDERER, Stefan ; MÜLLER, Christopher ; TIMMERER, Christian: Dynamic Adaptive Streaming over HTTP Dataset. In: *Proceedings of the 3rd Multimedia Systems Conference*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (MMSys '12). – ISBN 978-1-4503-1131-1, 89–94
- [90] HOLMA, Harri ; TOSKALA, Antti: *LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access*. John Wiley & Sons, 2009
- [91] 3GPP (Hrsg.): *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures (3GPP TS 36.213)*. Version 12.5.0 Release 12. 3GPP, 04 2015
- [92] 3GPP (Hrsg.): *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300)*. Version 12.5.0 Release 12. 3GPP, 04 2015
- [93] LARMO, Anna ; LINDSTROM, Magnus ; MEYER, Michael ; PELLETIER, Ghyslain ; TORSNER, Johan ; WIEMANN, Henning: The LTE link-layer design. In: *Communications Magazine, IEEE* 47 (2009), Nr. 4, S. 52–59



- [94] RATHI, Sonia ; MALIK, Nisha ; CHAHAL, Nidhi ; MALIK, Sukhvinder: Throughput for TDD and FDD 4 G LTE Systems. In: *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) Volume-3, Issue-12* (2014)
- [95] ZHOU, Min ; BERTOLOTTO, Michela: A Data Structure for Efficient Transmission of Generalised Vector Maps. Version:2004. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-25944-2\\_122](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-25944-2_122). In: BUBAK, Marian (Hrsg.) ; ALBADA, GeertDick (Hrsg.) ; SLOOT, PeterM.A. (Hrsg.) ; DONGARRA, Jack (Hrsg.): *Computational Science - ICCS 2004* Bd. 3039. Springer Berlin Heidelberg, 2004. – DOI 10.1007/978-3-540-25944-2\_122. – ISBN 978-3-540-22129-6, 948-955
- [96] *Google Protocol Buffers: Google's data interchange format.*  
<https://developers.google.com/protocol-buffers/> : online,